

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Учебное подразделение – Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Отделение – Электроэнергетика и электротехника(ОЭЭ)

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена</b>

УДК 621.315.2.016.2:621.315.616.9

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ74	Гринюк Михаил Сергеевич		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Леонов Андрей Петрович	к.т.н., доцент		

## КОНСУЛЬТАНТЫ:

Консультант ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шуликин Сергей Николаевич			

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Атепаева Наталья Александровна			

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Эльвира Яковлевна			

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
И.О. руководителя ОЭЭ	Ивашутенко А. С.	к.т.н., доцент		

Томск – 2019 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Учебное подразделение – Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника  
Отделение – Электроэнергетика и электротехника(ОЭЭ)

УТВЕРЖДАЮ:  
И.о. руководителя ОЭЭ  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>Магистерской диссертации</b>
---------------------------------

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ74	Гринюку Михаилу Сергеевичу

Тема работы:

<b>Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Исходными данными являются физико-механические характеристики силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Изучение материала по теме дипломной работы;</li><li>• Рассмотрение основных конструктивных элементов и материалов силового кабеля из сшитого полиэтилена и их назначение;</li><li>• Описание физики процесса старения изоляции;</li></ul>

области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Анализ существующих моделей для расчета ресурса кабеля;</li> <li>Обоснование критериев выбора параметров модели;</li> <li>Расчет силового кабеля с пластмассовой изоляцией;</li> <li>Расчет остаточного ресурса кабеля, при заданных условиях эксплуатации;</li> <li>Оценка степени влияния воздействующих факторов на прогнозируемый остаточный ресурс кабеля;</li> </ul>
---	---

**Перечень графического материала**  
(с точным указанием обязательных чертежей)

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Основная часть	Шуликин Сергей Николаевич
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Атепаева Наталья Александровна
Иностранный язык	Соколова Эльвира Яковлевна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Леонов Андрей Петрович	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ74	Гринюк Михаил Сергеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ГМ74	Гринюку Михаилу Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	- трудозатраты на перерабатываемый полимерный материал; - схема технологических процессов переработки полимерного материала; - перечень используемого оборудования
Нормы и нормативы расходования ресурсов	-расшифровка по статье сырье и материалы; -амортизация применяемого оборудования
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Оценка перспективности применения исследуемого полимерного материала в кабельной промышленности
Разработка устава научно-технического проекта	...
Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	...
Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Оценка экономической эффективности проекта и его рентабельности
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
Схема технологического процесса	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ГМ74	Гринюк М.С.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ74	Гринюку Михаилу Сергеевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ИШЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Определение остаточного ресурса кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочая зона – научно-исследовательская лаборатория АО «НИКИ». Объект исследования – кабельное изделие с изоляцией из вулканизированного полиэтилена. Область применения: питание электроэнергетических систем и сетей, передача мощности.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– № 426-ФЗ от 28.12.2013 г. – ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ – Постановление Минтруда РФ и Минобразования РФ от 13 января 2003 г. N 1/29
<b>2. Производственная безопасность</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– Отсутствие или недостаток естественного света; – Повышенный уровень шума на рабочем месте; – Отклонение показателей микроклимата; – Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека напряженность зрения; – Вещества раздражающего действия.
<b>3. Экологическая безопасность</b>	- описание выбросов, сбросов, твердых отходов после процесса обработки полимера; - влияние частиц материала и газов, на окружающую среду; - разработка решений по обеспечению экологической безопасности.

<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</b>	Наиболее вероятным ЧС в здании может быть пожар: разработка мер по предупреждению ЧС; разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Атепаева Наталья Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ74	Гринюк М.С.		

**Приложение А**  
**(справочное)**

Раздел 1

**Prediction of residual life of power cables with XLPE insulation**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ74	Гринюк Михаил Сергеевич		

Руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Леонов Андрей Петрович	к.т.н.		

Консультант школы ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шуликин Сергей Николаевич			

Консультант – лингвист ОИЯ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Соколова Эльвира Яковлевна			



## Реферат

Дипломная работа содержит 121 страницу текстового материала, 24 таблиц, 22 рисунка, 37 использованных источников. Графики и таблицы составлялись в графическо-расчетной программе ОС Windows Microsoft Excel, оформление текстового документа производилось в программе ОС Windows Microsoft Word.

Перечень ключевых слов: кабельное изделие, ресурс, остаточный, сшитый полиэтилен, поливинилхлорид, срок жизни, токовая нагрузка, математическая модель, напряженность, температура, нагрев жилы, прогнозирование, силовые кабели.

Тема: Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

В процессе выполнения выпускной дипломной работы был проведен литературный обзор по данной теме. В работе были рассмотрены следующие вопросы: материалы, применяемые для изготовления кабельных изделий, существующие конструкции силовых кабелей из сшитого полиэтилена, методы для контроля качества изоляционных материалов, применяемые на производстве, физика процесса старения, существующие математические модели для расчета ресурса. На основе существующей модели составлена расчетная формула определения остаточного ресурса силового кабеля с учетом эксплуатационных факторов.

В результате проделанной работы были получены зависимости срока службы кабельного изделия от основных эксплуатационных факторов, произведен расчет безотказного срока службы на основе данных о состоянии изоляции, полученных с помощью расчетной части. Разработанная математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля позволяет спрогнозировать износ изоляции и необходимость ее замены с учетом корректировок. Важным достоинством модели является ее реализуемость в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.

## **Список сокращений**

СПЭ – сшитый полиэтилен;

ПВХ - поливинилхлорид;

КЗ- короткое замыкание;

БПИ- бумажно пропитанная изоляция;

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	13
1. Обзор литературы .....	15
1.1 Основные конструкционные элементы кабелей из сшитого полиэтилена и их назначение .....	15
1.2. Материалы .....	23
2. Методическая часть .....	26
2.1 Основные методы диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	26
2.2 Физика процесса старения изоляции материала .....	27
2.3 Описание существующих моделей для расчета ресурса изоляции .....	31
2.4 Анализ воздействий, оказываемых внешними и внутренними факторами на изоляцию кабелей в процессе эксплуатации .....	40
2.5 Разработка математической модели для прогнозирования остаточного ресурса .....	42
3. Расчет силового кабеля с пластмассовой изоляцией .....	44
3.1 Электрический расчет .....	44
3.2 Тепловой расчет .....	55
3.3 Расчет остаточного ресурса при заданных условиях эксплуатации .....	67
3.4 Оценка полученных результатов.....	76
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	77
4.1 Анализ конкурентных технических решений.....	78
4.2 Планирование научно-исследовательских работ .....	82
4.3. Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	88
4.4 Ресурсоэффективность.....	92
5. Социальная ответственность .....	94
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	95
5.2 Производственная безопасность .....	96
5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	98
5.4 Экологическая безопасность .....	104
5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	109

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
---------------------------------------	-----

## **ВВЕДЕНИЕ**

Кабельные изделия используются для передачи информационных сигналов и электрической энергии на необходимое расстояние, таким образом, они участвуют в эксплуатации разнообразных электрических и радиочастотных устройств, электронных цепей и схем. Для работы любого технического устройства, так или иначе, необходимо питание, следовательно, ни одно из них не может полноценно работать без использования кабелей и проводов, которые в свою очередь образуют структурные системы для электроснабжения и контроля работы данных устройств.

Необходимость создания принципиально новых типов кабельных изделий с лучшими характеристиками вызвана техническим прогрессом во всех сферах промышленности. Таким образом, наблюдается рост потребности в изделиях кабельной продукции.

Характерные особенности кабельной техники, такие как применение высокой частоты, эксплуатация при высоких напряжениях, повышение передаваемой мощности и увеличение токовой нагрузки, разработка новых типов специализированных кабелей для работы в условиях высокого давления, перепадов температур, влияния агрессивной среды, приводят к повышению требований, применяемых к кабельным изделиям. Возникает необходимость создания новых материалов, в результате чего станет возможным использование специальных кабелей с улучшенными характеристиками, которые будут эксплуатироваться в различных отраслях народной промышленности.

Потребности в электроэнергии растут, разрабатываются новые типы силовых кабелей. Для повышения надежности кабельных линий необходимо снизить вероятность возникновения коротких замыканий, каждое из которых приводит к экономическим затратам. Одним из решений данной задачи является контроль и оценка состояния изоляционных материалов кабеля, который можно достичь определенными методами.

Для обеспечения прогнозирования остаточного ресурса в зависимости от времени эксплуатации, до выхода из строя изоляции необходимо описать все процессы, воздействующие на кабель. Это решается путем математического моделирования процесса старения изоляции кабельного изделия.

В дипломной работе систематизирована информация по данной теме. Данная тема актуальна в современном мире потому что, в настоящее время в области электроэнергетики поставлена задача на массовую цифровизацию. По анализу данных, полученных благодаря актуальной модели прогнозирования остаточного ресурса, становится возможным в режиме реального времени узнать состояние изоляции в кабельном изделии, в результате чего вынести решение о дальнейшей эксплуатации кабеля, либо же отправки его на регламентные работы.

Цель дипломной работы – разработка актуальной модели прогнозирования остаточного ресурса силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение материала по теме дипломной работы;
2. Рассмотрение основных конструктивных элементов и материалов силового кабеля из сшитого полиэтилена и их назначение;
3. Описание физики процесса старения изоляции;
4. Анализ существующих моделей для расчета ресурса кабеля;
5. Обоснование критериев выбора параметров модели;
6. Расчет силового кабеля с пластмассовой изоляцией;
7. Расчет остаточного ресурса кабеля, при заданных условиях эксплуатации;
8. Оценка степени влияния воздействующих факторов на прогнозируемый остаточный ресурс кабеля;

## **1. Обзор литературы**

### **1.1 Основные конструкционные элементы кабелей из сшитого полиэтилена и их назначение**

Развитие энергораспределительных сетей на среднее напряжение задает необходимость эксплуатации кабельных изделий, способных передавать большую токовую нагрузку. В течение последних лет ведется замена кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на термостойкие экструдированные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. В развитых странах Америки, а также в европейском регионе, большую часть рынка силовых кабелей занимают кабели, изолированные сшитым полиэтиленом.

Достоинства кабелей на среднее напряжение с пластмассовой изоляцией:

- предел рабочей температуры находится в более высоких численных значениях, чем у кабелей с бумажной изоляцией, что позволяет значительно увеличить передаваемую мощность;
- достаточная стойкость при работе в аварийных режимах, таких как перегрузка или короткое замыкание;
- возможность прокладки кабеля на объектах с разной высотой уровней;
- изоляционные материалы не содержат тяжелых наполнителей, масел и свинца, что значительно ускоряет установку, монтажные работы и эксплуатацию, а также снижает факторы, неблагоприятно влияющие на окружающую среду;
- высокая надежность при эксплуатации и меньшие экономические затраты на восстановление после аварийных режимов;
- за счет своей конструкции имеют меньший вес и величину радиуса изгиба;
- возможность изготовления кабелей большой строительной длины;
- конструктивное исполнение в виде одножильных и трехжильных кабелей с оболочкой из полиэтилена.

Улучшенные характеристики механической и термической стойкости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена связаны с их молекулярной структурой. На этапе вулканизации или «сшивки» изоляционного материала создаются новые связи путем распределения молекул полиэтилена.

Доля кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на российском рынке кабельной продукции в настоящее время увеличивается, таким образом, наблюдается рост производства и потребления СПЭ-кабеля. Для обозначения данного типа кабеля в российском регионе вводится аббревиатура СПЭ; в английских регионах - PE — PolyEthylene, X — Cross-linked или сокращенно XLPE.

Сравнение электромеханических характеристик кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с БПИ-кабелями:

- высокая передаваемая мощность (токовая нагрузка), зависящая от условий прокладки кабеля (в 1,4-1,5 раза выше);

- более высокие значения длительно допустимой температуры нагрева кабеля;

- при возникновении аварийных режимов (токов короткого замыкания) наблюдается относительно высокая термическая стойкость. Данная величина связана с материалом изоляции т.к. СПЭ-кабели обладают большей предельной температурой работы кабеля;

- повышенная механическая стойкость к динамическим и статическим нагрузкам;

- низкая удельная повреждаемость СПЭ-кабелей (4—5 раз ниже, чем у БПИ-кабелей);

- большой остаточный ресурс кабеля (по заявленным данным из технического паспорта - более 40 лет);

- меньшее значение радиуса изгиба, массы, диаметра кабеля по изоляции, отсутствие армированной оболочки облегчает условия монтажа кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена;



прокладка СПЭ-кабеля возможна при низких температурах до  $-25^{\circ}\text{C}$ , без предварительного обогрева конструкций, это обусловлено наличием полимерных материалов в изоляции и оболочке;

в конструктивных элементах СПЭ-кабеля нет жидких наполнителей, что позволяет уменьшить стоимость и время монтажных работ;

достаточно экологичны в виду отсутствия технических масел и их утечки в элементах СПЭ-кабеля, при повреждении не загрязняют окружающую среду;

в отличие от кабелей с БПИ- изоляцией гигроскопичность основных элементов СПЭ-кабеля имеет меньшее значение;

изоляция обладает высокими диэлектрическими характеристиками;

при проектировании трассы возможна прокладка при разных уровнях кабельных участков.

Главная отличительная особенность СПЭ-кабелей - принципиально новый вид изоляции, выполненный из сшитого полиэтилена. Свойства полиэтилена, как средства для изоляции устройств, известны достаточно давно. Обычный термопластичный полиэтилен имеет серьезные недостатки, одно из главных – значительное снижение электрических показателей при температурах, близких к температуре плавления полимерного материала. При достижении температуры в  $80^{\circ}\text{C}$  начинаются необратимые изменения в структуре изоляции: она начинает терять форму, значительно снижается тангенс угла диэлектрических потерь, и электрическая прочность. Изоляция из сшитого полиэтилена сохраняет форму, электрические и механические характеристики даже при температуре  $130^{\circ}\text{C}$ . Термин «сшивка» или «вулканизация» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур.

В мировой кабельной промышленности при производстве силовых кабелей используются две технологии сшивки, принципиальное различие которых заключается в реагенте, с помощью которого происходит процесс сшивки полиэтилена. Наибольшее распространение получила технология пероксидной сшивки, когда сшивка полиэтилена происходит с использованием специальных химических веществ — пероксидов в среде нейтрального газа при определенных температуре и давлении. Такая технология позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции и обеспечить отсутствие воздушных включений. Помимо хороших диэлектрических свойств, это и больший, чем у других кабельных изоляционных материалов, диапазон рабочих температур, и отличные механические характеристики. Пероксидная технология применяется при производстве кабелей среднего и высокого напряжений. Менее распространенной является силанольная сшивка, при которой в полиэтилен добавляются специальные смеси (силаны) для обеспечения сшивки при более низкой температуре. Сектор применения этой более дешевой технологии охватывает кабели низкого и среднего напряжений.

Существуют два варианта исполнения СПЭ-кабелей — трехжильный и одножильный. В основном СПЭ-кабели выпускаются в одножильном исполнении (рис. 2). Внешний вид одножильного СПЭ-кабеля: 1 — круглая многопроволочная уплотненная токопроводящая жила, 2 — экран по жиле из полупроводящего сшитого полиэтилена, 3 — изоляция из сшитого полиэтилена, 4 — экран по изоляции из полупроводящего сшитого полиэтилена, 5 — разделительный слой из полупроводящей ленты или полупроводящей водоблокирующей ленты, 6 — экран из медных проволок, скрепленных медной лентой, 7 — разделительный слой из двух лент крепированной бумаги, прорезиненной ткани, полимерной ленты или водоблокирующей ленты, 8 — разделительный слой из алюмополиэтиленовой или слюдосодержащей ленты, 9 — оболочка из полиэтилена, ПВХ-пластиката.



Рисунок 1 - Одножильный СПЭ-кабель

Отличительной особенностью трехжильного исполнения СПЭ-кабеля является наличие экструдированного междуфазного наполнителя из полиэтилена или поливинилхлоридного (ПВХ) пластика.

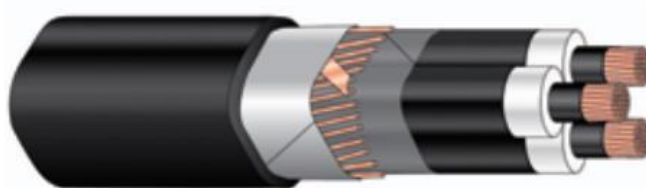


Рисунок 2 - Трехжильный СПЭ-кабель

Применение одножильных СПЭ-кабелей позволяет обеспечить прежде всего повышенную надежность электроснабжения за счет резкого снижения вероятности междуфазных коротких замыканий. Вероятность одновременного разрушения в одном месте изоляции двух конструктивно не связанных между собой одножильных кабелей (соединительных или концевых муфт) соответствует вероятности междуфазных повреждений ошиновки с изолированными шинами, т.е. очень мала. Вероятность однофазных замыканий на землю при применении одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена намного меньше, чем при использовании трехжильных БПИ-кабелей. Это достигается как самой конструкцией одножильных СПЭ-кабелей, так и лучшими диэлектрическими свойствами изоляции. Одножильное исполнение СПЭ-кабелей позволяет выполнять сечения токоведущих жил до 800 мм. Кабели с таким сечением способны успешно конкурировать с токопроводами, применяемыми в системах электроснабжения энергоемких предприятий.

Экранирование элементов кабеля необходимо для электромагнитной совместимости кабеля с различными внешними цепями и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жилы кабеля и, следовательно, для создания более благоприятных условий работы изоляции. Внутренние экраны выполняются из полупроводящей пластмассы, внешний экран — из медных проволок и лент.

Основной задачей, которую решает экран из медных проволок, является выравнивание электрического поля, действующего на главную изоляцию кабеля (изоляцию жилы), т.е. для выполнения своих функций экран должен быть заземлен. Помимо металлического экрана в конструкции есть полупроводящие экраны: один наносится на внешнюю поверхность жилы, а другой — поверх слоя главной изоляции кабеля на внутреннюю поверхность металлического экрана. Полупроводящие экраны обеспечивают локальное выравнивание напряженности электрического поля на негладкой поверхности проволочной жилы и проволочного металлического экрана. Изоляция экрана предназначена для избежания попадания воды в кабель, через проволочки экрана в главную изоляцию. Надежность кабеля во многом зависит от целостности его оболочки.

Наружная защитная оболочка предохраняет внутренние элементы кабеля от попадания влаги и механических повреждений при его монтаже и эксплуатации. Наружные оболочки СПЭ-кабелей изготавливаются из полиэтилена или ПВХ-пластиката повышенной прочности.

Условные буквенно-цифровые обозначения (маркировка) кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена:

А — алюминиевая токоведущая жила, нет обозначения — медная токоведущая жила,

Пв — материал изоляции — сшитый (вулканизированный) полиэтилен,

П или В — оболочка из полиэтилена или ПВХ-пластиката,

у — усиленная полиэтиленовая оболочка увеличенной толщины,

нг — оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести,

нгд — оболочка из ПВХ-пластиката пониженного дымогазовыделения,

г — продольная герметизация экрана водоблокирующими лентами,

1 или 3 — количество токоведущих жил,

50—800 — сечение токоведущей жилы, мм<sup>2</sup>,

гж — герметизация токоведущей жилы, 2 16—35 — сечение экрана, мм,

1—500 — номинальное напряжение, кВ.

Пример обозначения: АПвПг 1х240/35—10 — кабель с алюминиевой жилой (А), СПЭ-изоляцией (Пв), полиэтиленовой оболочкой (П), герметизацией экрана (г), одножильный (1), сечение жилы 240 мм, сечение экрана 35 мм, номинальное напряжение 10 кВ.

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена используются при строительстве кабельных линий электропередачи под землей, в траншеях, в кабельной канализации, под дну рек и озер, а также в грунтах различных категорий. Кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при номинальном напряжении 10 кВ частоты 50 Гц в трехфазных сетях с заземленной нейтралью и прямой связью с воздушной линией или без нее на трассах с неограниченной разностью уровней.

Конструкция:

Многопроволочная, круглая, уплотненная токопроводящая жила, алюминиевая или медная, класс гибкости жилы 1. Жилы сечением 1000 мм<sup>2</sup> и 1200 мм<sup>2</sup> – сегментированные, скрученные по системе «Милликен».

Внутренний экструдированный электропроводящий слой

Изоляция из пероксидносшитого полиэтилена

Внешний экструдированный электропроводящий слой. Слой обмотки электропроводящей полимерной лентой или электропроводящей бумагой, или электропроводящей водоблокирующей лентой(кабели с индексом «г» или «2г»)

Экран из медных проволок. Возможно введение в экран распределенного оптического датчика температуры

Медная лента

Алюмополимерная лента для кабелей с индексом «2г»

Наружная оболочка из полиэтилена, ПВХ-пластиката или пластиката пониженной горючести, не содержащей галогенов (кабели с индексом «нг(A)», «HF»).

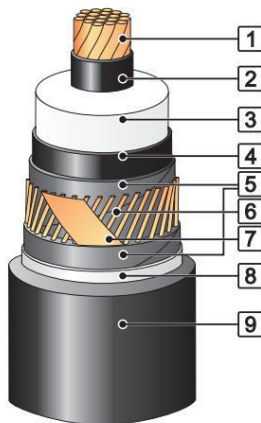


Рисунок 3 - конструкция кабеля СПЭ

Наложение внутреннего полупроводящего слоя, изоляции и внешнего полупроводящего слоя поверх проводника из меди или алюминия производится в один технологический процесс, что обеспечивает ровные поверхности раздела и отсутствие загрязнений. Эти три слоя в сочетании с жилой образуют сердечник кабеля. Сердечник кабеля окружен медным проволочным экраном, который защищает кабель во время прокладки, поддерживает нулевой потенциал на поверхности кабеля, несет зарядные токи, отводит токи при коротких замыканиях. Зона экрана из медных проволок обеспечивается продольной водонепроницаемостью с помощью водонабухающего материала так, чтобы вода не могла проникнуть в кабель при повреждении внешней оболочки. Двойная герметизация экрана обеспечивается алюминиевой лентой с полимерным покрытием, которая сварена с наружной полиэтиленовой оболочкой. Внешняя оболочка выполняется из износостойкого светостабилизированного полиэтилена высокой плотности, или ПВХ пластиката.

## 1.2. Материалы

Своими уникальными свойствами кабели с изоляцией из СПЭ обязаны применяемому изоляционному материалу. Полиэтилен в настоящее время является одним из наиболее применяемых изоляционных материалов при производстве кабелей. Но изначально термопластичному полиэтилену присущи серьезные недостатки, главным из которых является резкое ухудшение механических свойств при температурах, близких к температуре плавления. Решением этой проблемы стало применение сшитого полиэтилена.

Термин «сшивка» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, больший диапазон рабочих температур.

Исходным сырьем для сшитого полиэтилена служит полиэтилен высокой плотности и повышенной прочности с обычной линейной структурой. Сшивка заключается в том, что при высоких температуре и давлении, а также под воздействием облучения электронами, и при добавлении определенных химических соединений происходит объединение молекулярных цепочек полиэтилена в единую трехмерную структуру.

Помимо повышенных ударной прочности и ударной вязкости, сшитый полиэтилен обладает чрезвычайно полезными свойствами, недостижимыми для других материалов, которые и определяют основные области его применения.

При прокладке в земле применяется оболочка из полиэтилена высокой плотности, обеспечивающая необходимую защиту кабеля от механических повреждений, как при прокладке, так и в процессе эксплуатации. Если необходима герметизация экрана, используется два разделительных слоя

водоблокирующих лент под и поверх медного экрана, накладываемых с перекрытием. При прокладке кабеля в кабельных сооружениях применяется оболочка из ПВХ-пластиката пониженной горючести.

Сшитый полиэтилен может производиться по разным технологиям при изменениях температуры, давления проходящей реакции, а также сопутствующих веществ. При этом получают материалы, которые несколько отличаются по своим свойствам. В электроизоляционной промышленности используются:

1. РЕХб – полиэтилен, «сшитый» химическим силановым (или силанольным) способом. В его производстве используются вещества кремневодороды, которые с повышением температуры до 80-90 °С участвуют в гидролизе, связывая боковые ответвления полимерных макромолекул. Сравнительно дешевый метод, дает около 65 % сшивки. Был очень распространен на начальном этапе использования полиэтилена в качестве кабельной изоляции, но давал неравномерность распределения свойств по всему объему.
2. РЕХа «сшивается» в присутствии перекиси водорода, из-за чего называется «пероксидным», при повышении температуры до 400 °С и давления 8-9 атм. Такой метод модификации полиэтилена более сложный и дорогой, но дает до 80 % сшитых молекул и сравнительно равномерное распределение показателей по объему материала. Получил наибольшее применение как высоковольтная изоляция большой толщины.

Изоляция РЕХб разрешена только для кабелей, рассчитанных на напряжение не более 1 кВ. При большем напряжении она имеет меньшую электростойкость, часто дает пробой и быстро приходит в негодность. Для изоляции провода в 10-35 кВ и более используется только материал РЕХа.

Изоляция из сшитых образцов полиэтилена используется в производстве одножильного и трехжильного кабеля, применяемых как в однолинейной, так и в групповой прокладке на открытых местах, в кабельных конструкциях,



под землей. Толщина изоляции варьируется от 3,4 до 35 мм при сечении кабеля от 35-ти до 3000 мм<sup>2</sup> и протекании тока напряжением до 550 кВ.

Выбор материала экрана зависит от того является ли поле, воздействующее на кабельное изделие электрическим или магнитным. В общем случае магнитные материалы обеспечивают большее поглощение излучаемой электромагнитной энергии, а хорошие проводники, такие как медь или алюминий обладают высокой отражающей способностью. Последние более эффективно экранируют электрические поля, но их эффективность снижается с увеличением частоты. В диапазоне низких частот и хорошего экранирования, магнитных полей можно применять сплавы с большей магнитной проницаемостью, такие как латунь.

В качестве материала магнитных экранов в слабых полях используются сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Пермаллой, относящиеся к группе ковких сплавов с высокой магнитной проницаемостью, хорошо обрабатываются резанием и штамповкой. По составу пермаллой принято делить на низконикелевые (40-50% Ni) и высоконикелевые (72-80% Ni). Для улучшения электромагнитных и технологических свойств пермаллой часто легируют молибденом, хромом, кремнием, кобальтом, медью и другими элементами. Основными показателями электромагнитного качества этих сплавов являются значения начальной и максимальной магнитной проницаемости. Коэрцитивная сила у пермаллоев должна быть как можно меньше, а удельное электрическое сопротивление  $\rho$  и намагниченность насыщения как можно более высоким.

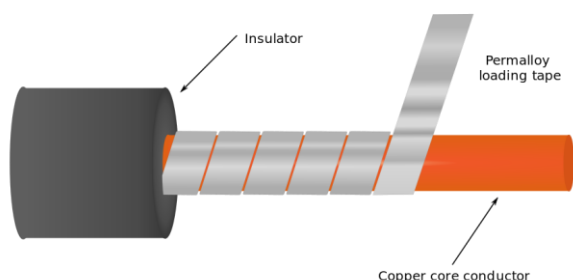


Рисунок 4 - Схема экранирования кабеля пермаллоем

Низконикелевый пермаллой применяют для изготовления магнитных экранов, работающих в слабых постоянных магнитных полях. Легированный кремнием и хромом низконикелевый пермаллой применяют при повышенных частотах.

## **2. Методическая часть**

### **2.1 Основные методы диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена**

Для обеспечения надежности работы силовых кабелей необходимо производить их проверку перед введением в эксплуатацию. Проверке могут подвергаться токоведущие жилы кабеля (для обеспечения соединения источника электрической энергии с потребителем) и их изоляция (для избегания коротких замыканий). При вводе кабельных линий 6-10 кВ со сшитой полиэтиленовой изоляцией в эксплуатацию могут проводиться следующие испытания:

- 1) Проверка целостности и фазировки жил кабеля.
- 2) Измерение сопротивления изоляции. Величина сопротивления не нормируется, измерение сопротивления производится до и после испытания повышенным напряжением.
- 3) Испытание номинальным или повышенным напряжением выпрямленного тока (в некоторых случаях проводится испытание напряжением промышленной или сверхнизкой частоты (0,01-0,1 Гц)).
- 4) Измерение распределения тока по одножильным кабелям. Неравномерность в распределении токов на кабелях не должна быть более 10%.

5) Контроль состояния антикоррозийного покрытия, при наличии.

6) Измерение сопротивления заземления.

Изоляционные материалы в большей степени подвержены разрушению под воздействием внешних и внутренних факторов, поэтому наибольшее внимание следует уделить испытаниям изоляции. Нормируемая проверка повышенным напряжением является разрушающей для изоляции, так как, кроме прожига имеющихся изъянов (образовавшихся в процессе производства или как следствие некачественного монтажа), ускоряется процесс деструкции изоляционного материала, что ведет к образованию новых дефектов в изоляции и сокращению срока ее службы. Кроме того, при использовании постоянного напряжения для испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в них может накапливаться объемный заряд, наличие которого может привести к быстрому выходу кабеля из строя. В связи с этим в настоящее время существует тенденция по внедрению неразрушающих методов контроля и диагностики изоляции, которыми являются:

- 1) Измерение частичных разрядов в изоляции;
- 2) Измерение тангенса угла диэлектрических потерь;
- 3) Измерение напряжения/тока процессов поляризации/деполяризации диэлектрика.

## **2.2 Физика процесса старения изоляции материала**

Частичным разрядом называется электрический разряд малой мощности, который шунтирует лишь часть изоляции, и не вызывает значительного изменения напряжения между электродами. Как правило, частичные разряды возникают в изоляции в местах нахождения внутренних дефектов (пузырьков газов, различных микрочастиц твердых примесей) по той причине, что в этих местах возникает неоднородность электрического поля,

напряженность которого внутри дефекта может быть намного выше, чем в изоляционном материале.

Как правило, электрическая прочность примесей существенно меньше электрической прочности изоляции, поэтому в месте дефекта возникает локальный электрический пробой. Источниками ЧР высокой интенсивности обычно являются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя, развивающиеся из неоднородностей, образующихся в изоляции при изготовлении и в процессе эксплуатации как следствие деструкции и/или деполимеризации материала по причинам естественного старения изоляции. Кроме того, источниками ЧР могут быть места некачественного монтажа, например, кабельных муфт. Внутри дефектов изоляции, образовавшихся как следствие недостатков технологии изготовления, в процессе эксплуатации под воздействием электрического поля возникают частичные разряды, вызывая рост дендритов. Для заполненных газами дефектов существенным является тот факт, что для возникновения частичных разрядов в газовых включениях требуется меньшая напряженность электрического поля, так как диэлектрическая проницаемость газов меньше, чем проницаемость жидкостей и твердых примесей. Как следствие интенсивность частичных разрядов может быть существенно выше на начальных стадиях развития дефекта. Микропоры в изоляции могут быть заполнены водой, имеющейся в изоляции в виде раствора или проникающей в изоляцию из окружающей среды.

К неразрушающим методам контроля состояния изоляции, также относят составление моделей и последующий расчет основных параметров кабеля с учетом условий его эксплуатации. Данные методы позволяют оценить состояние изоляции кабельного изделия в режиме реального времени, независимо от срока его эксплуатации. Основным аспектом в постановке и последующем решении задачи прогнозирования времени эксплуатации до износа изоляции заключается в описании физики переходных процессов,

происходящих в изоляции математическим аппаратом или моделировании процесса ее старения с помощью специально разработанных программ.

При работе кабеля в номинальном режиме происходит постепенное ухудшение изоляционных свойств. Этот процесс вызван вследствие нелинейного изменения динамических характеристик, таких как воздействие внешнего магнитного и электрического поля, перепад температур, механическое воздействие, обусловленное динамическими нагрузками на растяжение и сжатие, воздействие факторов окружающей среды (свет, радиация), влажность, воздействие инертных газов. На уровне химических реакций, процесс влияния внешних воздействий на скорость распада молекулы можно описать с помощью закона Аррениуса:

$$K_i = K \cdot e^{\frac{-w_a}{kT}} \quad (1)$$

где  $Kt$  – средняя вероятность распада одной молекулы в единицу времени, переменная отвечает за скорость химических реакций;  $K$  – коэффициент, зависящий от материала веществ, участвующих в реакции;  $W_a$  – энергия активации;  $k$  – справочное значение постоянной Больцмана.

Для более лучшего понимания данного явления приведен частный случай старения изоляции в электростатическом поле с высокой напряженностью. На отдельно взятый участок изоляции воздействует электрическое поле, вследствие чего на этом участке возникают частичные разряды. Происходит нелинейный рост частичных разрядов и при их периодическом повторении они начинают процесс разрушения изоляции, т.к. в ней появляются микротрещины. При достижении максимально допустимого значения электрической прочности происходит пробой. Для определения и расчета состояния изоляционного материала выведен закон, описывающий механизм образования и разделение дефектов в диэлектрическом материале. В качестве испытуемого образца был выбран полиэтилен.

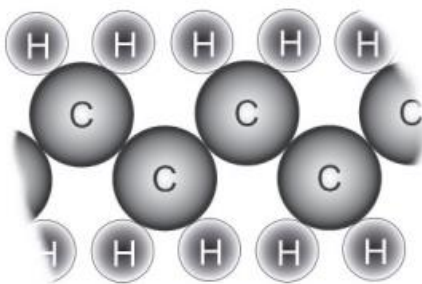


Рисунок 5 – Структура молекулы полиэтилена

В химической формуле полиэтилена, при пробое разрушаются связи атома углерода с соседними атомами углерода и образуются свободные атомы водорода, которые могут стать причиной возникновения пузырьков. Образующийся несвязанный водород выбивается в качестве положительно заряженного иона  $H^+$ , который, в свою очередь, способствует ионизации и дальнейшему разрушению молекулярной структуры полиэтилена в целом и впоследствии, захватывая свободный электрон, становится нейтральным, а углерод становится проводящей микрочастицей. При этом соседние атомы углерода образуют связи между собой.

Кроме того, возможен вариант, когда свободный водород образует связи с соседними атомами углерода в неразрушенных молекулах и образует концевые группы. При разрушении такой связи под воздействием электрического поля образуется свободный водород и концевая группа с соседним атомом углерода.

Причины старения в полиэтиленовой изоляции неизбежны, как технологические, так и эксплуатационные. К таким дефектам относятся микроразмерные воздушные полости, посторонние включения, трещины и др. Они появляются в изоляции в процессе ее изготовления или прокладки и функционирования кабелей вследствие, например, периодических сжатий и расширений материала в режимах нагрузки. Эти микропустоты заполнены газом из-за возникновения водяного пара и наличия летучих продуктов в производственных процессах сшивки и экструзии изоляции.

## 2.3 Описание существующих моделей для расчета ресурса изоляции

1. Упрощенная модель изоляции из полиэтилена как срез размерами  $100 \times 100$  молекул  $\text{CH}_2$ , в которых может произойти пробой под воздействием электрического поля.

Представим квадрат ( $100 \times 100$ ) как систему координат, где координаты пробоя определяются случайно. Рассматривается частный случай старения изоляции в электрическом поле (ЭП) высокой напряженности. Под действием ЭП старение происходит за счет развития в изоляции частичных разрядов. Периодически повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию путем появления в ней микротрещин, что приводит в итоге к ее пробое. Для определения степени деградации изоляции, ведущей к пробое, используется закон распределения появления дефектов в диэлектрике.

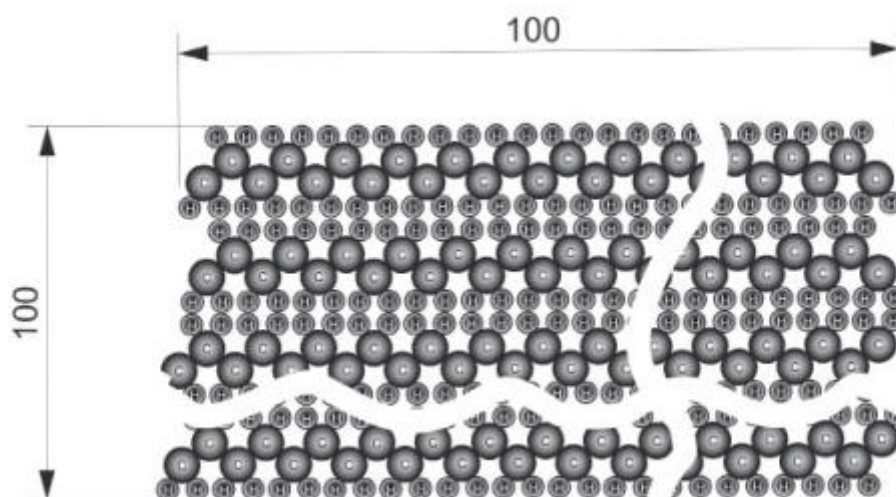


Рисунок 5 – Модель изоляции в виде среза  $100 \times 100$  молекул  $\text{CH}_2$

При использовании случайной функции, выбранной исходя из рабочего напряжения кабеля на 10 кВ и толщины изоляции, определялись координаты разрушенных клеток, и при разрушении на одной прямой 10 клеток из 100 считалось, что произошел пробой. Очевидно, что эта модель нуждается в доработке. В первую очередь, необходимо определить критерий возникновения пробоя изоляции, то есть степень разрушения материала по

радиусу изоляции для возникновения пробоя. Согласно полученной зависимости основная часть пробоев изоляции приходится в промежутке от 300 до 500 пробитых молекул.

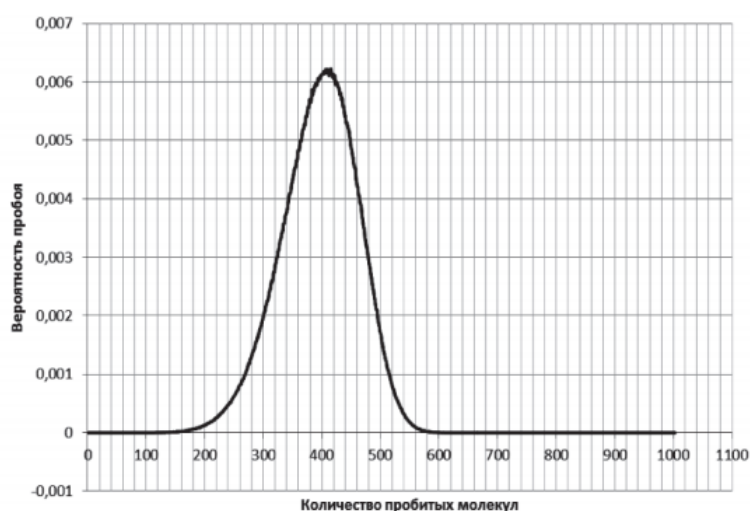


Рисунок 6 - График зависимости вероятности пробоя участка изоляции от количества пробитых молекул СН

Для расчета принимается среднее значение в 400 молекул. Размер поля для расчета составляет  $100 \times 100$  клеток, то есть всего на поле 10 000 молекул. Таким образом, для пробоя изоляции достаточно пробить 4 % молекул, при условии, что при каждом частичном разряде будет пробиваться только одна молекула, тогда как в действительности за один частичный разряд может пробиться большее количество молекул.

## 2. Статистическая модель для определения критической степени разрушения изоляционного слоя.

Анализ этой модели показал, что одна из наиболее вероятных форм возникновения дефекта — эллиптическая, распределенная по радиусу кабеля, т.к. дефекты изоляции, которые приводят к пробоям, обычно представляют собой дендритные образования — структурные каналы в изоляции, заполненные жидкостью, твердыми примесями или газами. Моделирование различных размеров дефекта показало значительный запас электрической прочности изоляционного материала. Для возникновения напряженности



электрического поля выше пробивной, принятой 6 кВ/мм для состаренного кабеля, необходимо разрушить около 78 % изоляции по радиусу, согласно картине электрического поля и распределению напряженности электрического поля в области дефекта.

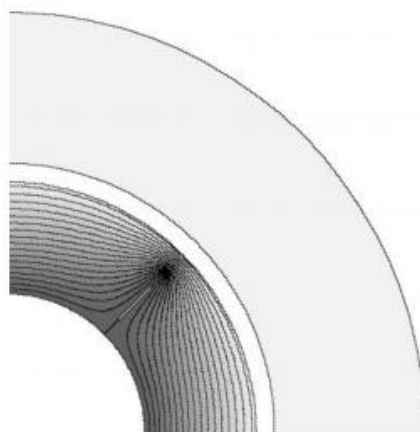


Рисунок 7 – Электрическое поле кабеля с дендритом

Для выполнения расчета в трех измерениях предлагается использовать параллелепипед со сторонами, пропорциональными размерам изоляции кабеля по длине, толщине и внутренней длине окружности изоляции. Использование такой формы позволит учесть возможность роста дендрита не только вдоль радиуса. Для определения пропорциональности сторон необходимо рассчитать размеры каждой из них. Однако для расчета необходимо преобразовать полученный параллелепипед в трехмерный массив элементов для проведения расчета. Результаты моделирования показали, что плотность вероятности пробоя изменяется по закону распределения Вейбулла, которое выражается формулой:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент формы,  $\lambda$  — коэффициент масштаба.

Для математического расчета остаточного ресурса изоляции кабелей требуется знать функцию вероятности пробоя в зависимости от степени разрушения материала. Для распределения Вейбулла она имеет вид:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\chi}\right)^k} \quad (3)$$

В результате моделирования установлено, что при разрушении материала до 35,5 % вероятность пробоя составляет менее 1 %, после чего начинает существенно увеличиваться. Таким образом, при разрушении материала до 35,5 % велика вероятность безотказной работы изоляции. В области от 35,5 % до 78 % вероятность пробоя существенно возрастает, что говорит о возможности частого появления дефектов изоляции.

3. Метод определения корреляционной зависимости между характеристиками изоляции кабеля и характеристиками, прямо связанными с ресурсом кабелей.

Основной причиной выхода из строя кабелей с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией, находящихся под длительным воздействием повышенных температур и механических нагрузок (термомеханическое старение) при рабочих напряжениях, является растрескивание оболочек и изоляции кабелей. Стойкость к растрескиванию количественно определяется температурой холодостойкости  $T_x$ . Разными исследователями было установлено, что уменьшение ресурса кабелей с ПЭ изоляцией в условиях эксплуатации  $T_x$ . ПЭ изоляции повышается. Тепловое движение структурных элементов в полимерах и их подвижность обуславливает релаксационные переходы, которые изучаются методами релаксационной спектроскопии. В первую очередь структурная необходимость проявляется при изучении температурно-частотных спектров диэлектрических и механических потерь. Это подтверждено экспериментально. Спектры механических потерь отражают те же процессы молекулярного движения, что и диэлектрические. Для диэлектрических спектров различимы три основных перехода : низкотемпературный  $\gamma$ -максимум диэлектрических потерь определяется подвижностью отдельных групп макромолекулы;  $\beta$ -максимум связан с сегментальной подвижностью, он находится выше температуры стеклования

полимера. Экспериментально доказано, что  $\gamma$ - и  $\beta$ - максимумы находятся при отрицательных температурах по Цельсию и являются малоинформативными;  $\alpha$ - максимум связан с сегментальной подвижностью полярных групп по поверхности кристаллитов, находится при повышенных температурах и является информативным. По мере старения в области  $\alpha$ - релаксации происходит увеличение тангенса угла диэлектрических потерь в максимуме температурной и частотной зависимости и, что самое главное, происходит смещение местоположения максимума  $\text{tg} \delta$  на температурных зависимостях в область более высоких температур  $\Delta T_m$  примерно на 35 °С от исходного состояния до полного расходования ресурса, а на частотных зависимостях – в область низких частот  $\Delta f_m$  примерно на 750 Гц. Отклонение местоположения  $\text{tg} \delta_m$  от исходного состояния  $\Delta T_m$  или  $\Delta f_m$  является количественной мерой оценки процесса старения. Экспериментально установлено, что между выбранными параметрами – критериями  $\Delta T_m$  или  $\Delta f_m$  и общепринятым критерием – температурой холодостойкости – имеется прямая корреляционная зависимость. Эти зависимости можно представить линейными функциями:

- от температуры

$$T_x - 189 - 1,7\Delta T_m \quad (4)$$

- от частоты приложенного напряжения

$$T_x = 154 - 0,13\Delta f_m \quad (5)$$

где  $T_x$  температура холодостойкости по Кельвину. При этом для определения необходимо от кабеля отрезать образец и экспериментально определить ее величину, т.е. этот метод неприемлем в эксплуатации.

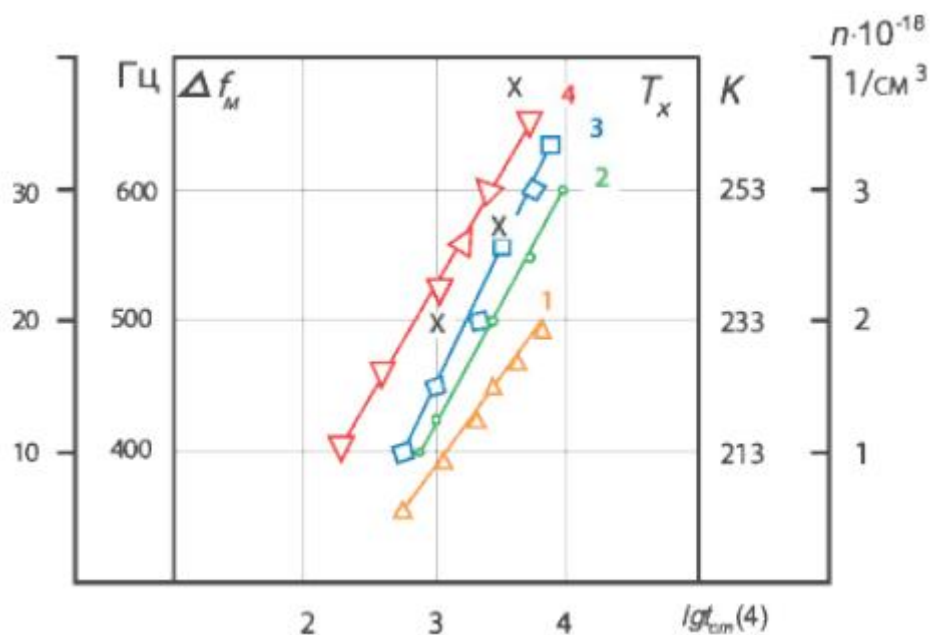


Рисунок 8 – Зависимости параметров старения

При изучении температурно-частотных спектров диэлектрических потерь эксперименты проводятся на отрезках кабелей или КЛ без изъятия образцов, т.е. метод является неразрушающим (испытательное напряжение составляет 30–50 В, диапазон частот – до 15 кГц, что не может повлиять на изоляцию в момент испытаний). Вводится понятие коэффициента изменения параметра работоспособности от времени старения:

$$K_n = \frac{\Pi_{\text{пр}} - \Pi_{\text{н}}}{\ln \tau_{\text{пр}} - \ln \tau_{\text{н}}} \quad (6)$$

где  $\Pi_{\text{пр}}$ ,  $\Pi_{\text{н}}$  – соответственно значения параметра: предельное (выработанный ресурс) и наработанное в процессе эксперимента;

$\tau_{\text{пр}}$  – предельное значение наработки, соответствующее  $\Pi_{\text{пр}}$ ;

$\tau_{\text{н}}$  – наработанный ресурс в момент измерения параметра  $\Pi_{\text{н}}$ .

В соответствии с (6) можно определить наработанный ресурс:

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{прф}} \cdot \exp \left[ \frac{\Pi_{\text{н}} - \Pi_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{\text{р}}} - \frac{1}{T_{\text{ф}}} \right) \right] \quad (7)$$

где  $\tau_{\text{прф}}$  - предельное значение ресурса в форсированном режиме испытаний;

$T_{\text{ф}}$  – температура старения в форсированном режиме;

$T_{\text{р}}$  – рабочая температура кабеля;

$W$  – 54 кДж/моль - условная энергия активации процесса разрушения ПЭ.

Для использования формулы (5) необходимо предварительно определить параметры-критерии работоспособности –  $\Delta T_{\text{м}}$  и  $\Delta f_{\text{м}}$ . Измерение параметра  $\Delta T_{\text{м}}$  необходимо проводить при равномерном нагреве кабеля, что практически невозможно. Более удобным параметром является  $\Delta f_{\text{м}}$ . Был разработан экспресс-метод позволяющий определить параметр  $\Delta f_{\text{м}}$ , проводя измерения лишь на двух частотах. Получена формула для определения  $f_{\text{м}}$  :

$$f_{\text{м}} = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \cdot \left( \frac{f_1^{\lambda} \cdot \text{tg} \delta_1 - f_2^{\lambda} \text{tg} \delta_2}{f_2^{\lambda} \text{tg} \delta_2 - f_1^{\lambda} \cdot \text{tg} \delta_1} \right)^{\frac{1}{\lambda^2}}} \quad (8)$$

где  $\lambda=0,4-0,8$  – параметр распределения времен релаксации.

После определения  $f_{\text{м}}$  вычисляется параметр  $\Delta f_{\text{м}}$ .

#### 4. Математическая модель появления включения

В ИМ кабельных линий электрических сетей имеются разнообразные неоднородности в виде включений, прослоек между отдельными слоями, микротрещин, отслоения изоляции и др. За счет перераспределения электрического поля вследствие различия диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и удельной проводимости  $\gamma$ , т.е.  $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$  или  $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$  в местах этих неоднородностей возникает высокая локальная напряженность поля. Развитие разряда в области включения, где имеет место высокая локальная напряженность поля, вызывает неполный пробой изоляции – ЧР.

Для выявления закономерностей развития ЧР в газовых включениях, определим характеристики ЧР, участвующие в разрушении ИМ

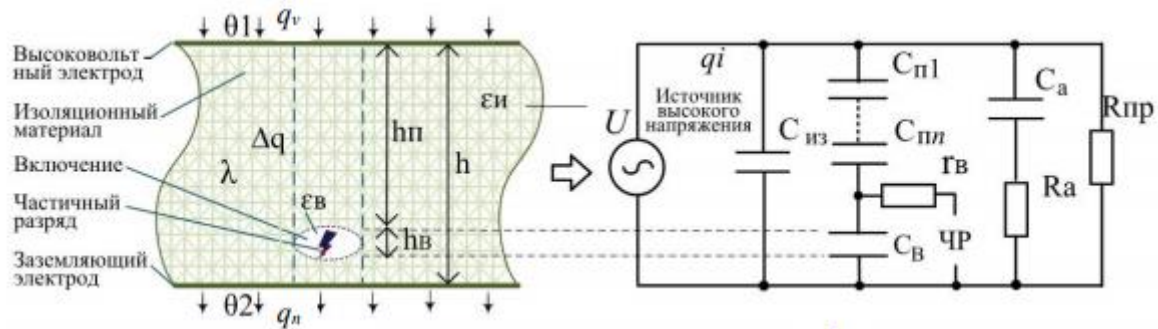


Рисунок 9 – Схема развития ЧР в изоляции и эквивалентная электрическая схема замещения в момент возникновения ЧР во включении

,где  $C_в$  – ёмкость газового включения;  $C_{п1} - C_{пн}$  – емкость изоляции, включенной последовательно с газовым включением;  $r_в$  – сопротивление канала в газовом включении;  $C_{из}$  – емкость остальной части изоляции;  $R_a$  – сопротивление абсорбции;  $R_{пр}$  – сопротивление проводимости;  $h$  – толщина изоляционного материала;  $h_{п}$  – толщина изоляции, расположенной последовательно с включением;  $h_в$  – толщина изоляции включения (размер включения);  $\lambda$  – теплопроводность;  $Q_1$  и  $Q_2$  – выделенное и отведенное количество теплоты имеет место при температурах  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ).

Для исследования величины области включения, процесса развития ЧР, а следовательно, механизмов старения и электрического пробоя ИМ, необходимо определить параметры ЧР, а именно, установить связь между напряжением возникновения  $U_{чр}$  его максимальной величиной  $q_{чр}$  и толщиной включения  $h_в$ . Напряженность электрического поля в газовом включении превышает напряженность поля изоляционного материала, так как его диэлектрическая проницаемость значительно выше диэлектрической проницаемости газа ( $\epsilon_{воздуха}=1$ ). Если к изоляционному материалу приложено напряжение  $U = U_m \sin \omega t$ , то на газовом включении напряжение будет равно:

$$U_в = U \cdot \frac{C_{п}}{C_в} \quad (9)$$

Прикладываемое напряжение вызывает накопление поверхностного заряда на границе газового включения и остального диэлектрика. Когда напряжение на включении достигнет напряжения начальной ионизации газа, произойдет ЧР емкости включения:

$$U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{C_{\text{в}} + C_{\text{п}}}{C_{\text{в}}} \quad (10)$$

$$\text{где } C_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}, C_{\text{в}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h_{\text{в}}}$$

$U_{\text{в.пр}}$  – пробивное напряжение газового включения;  $S_{\text{в}}$  – площадь газового включения.

После подстановки  $C_{\text{в}}$ ,  $C_{\text{п}}$  в с учетом, что  $h_{\text{в}} \ll h$  и неоднородности электрического поля изоляции, получим:

$$U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{в}}} \cdot \frac{h}{\delta K_n} \quad (11)$$

где  $K_n = E_{\text{max}}/E_{\text{ср}}$  – коэффициент неоднородности электрического поля в изоляции, равный отношению максимальной напряженности  $E_{\text{max}}$  к средней напряженности  $E_{\text{ср}}$  в изоляционном промежутке. Изоляционный материал имеет толщину включения  $h_{\text{в}}$ , диэлектрическую толщину  $h$  и диэлектрическую проницаемость изоляционного материала  $\varepsilon_{\text{и}} = \varepsilon_{\text{п}}$

, где  $h_{\text{в}} \ll h$  при рабочем напряжении  $U$ , напряжение на включении:

$$U_{\text{в}} = \varepsilon_{\text{п}} \frac{h_{\text{в}}}{h} \cdot U \quad (12)$$

Чем больше напряжение  $U_{\text{чр}}$ , тем выше допустимое для изоляции длительно воздействующее рабочее напряжение. Рост прикладываемого напряжения ведет к линейному росту уровня ЧР, а также к понижению порога их возникновения. При определенном напряжении  $U_{\text{кр}}$  – напряжение

критических ЧР,  $\eta_{\text{чр}}$  – интенсивность ЧР резко возрастает, что приводит к резкому разрушению изоляции и снижению срока службы.

#### **2.4 Анализ воздействий, оказываемых внешними и внутренними факторами на изоляцию кабелей в процессе эксплуатации**

В процессе эксплуатации кабельных линий электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена изоляционный материал может подвергаться ряду внешних и внутренних разрушающих воздействий, приводящих к его старению:

1. Температурное воздействие определяет скорость протекания химических реакций деструкции и деполимеризации сшитого полиэтилена;
2. Повышенная влажность окружающей среды может вызывать увлажнение изоляции и ухудшать ее свойства. Для определения степени увлажненности определяется коэффициент абсорбции, и производят сушку изоляции. Кроме того, содержание воды в микропорах изоляционного материала вызывает явление водного триинга, ускоряющее развитие дефектов в изоляции ;
3. Ультрафиолетовое излучение оказывает разрушающее воздействие на поверхность изоляции, так как фотоны ультрафиолетового диапазона обладают высокой энергией и разрушают молекулярную структуру изоляции (отщепляют боковые группы, чаще водород) на ее поверхности, приводят к повышению твердости изоляции, ее иссушиванию, растрескиванию и, таким образом, к ухудшению изоляционных свойств. Это явление еще называют фотохимической деструкцией.
4. Химические воздействия выражаются в многообразии химических веществ, которые могут воздействовать на изоляцию и разрушать ее, например, азотную кислоту, способную разрушать полиэтилен в 50% растворе, или наличие кислорода из воздуха, приводящего к термоокислительной деструкции;



5. Механические воздействия вызывают разрушение межатомных связей при возникновении механического напряжения выше энергии связей атомов;

6. Действие радиации на диэлектрик может приводить к различным повреждениям на молекулярном уровне. Происходит изменения структуры, свойств, состояния вещества. Носители заряда, образующиеся в облучаемом веществе, создают стационарные и нестационарные токи и приводят к накоплению объемного заряда в диэлектриках, который может сохраняться в течение длительного времени.

Однако разработка системы мониторинга всех перечисленных факторов является достаточно сложной задачей ввиду необходимости глубокого изучения природы всех перечисленных воздействий на изоляцию. Кроме того, требуется индивидуальный подход к мониторингу остаточного ресурса каждого конкретного кабеля, так как воздействие некоторых факторов на изоляцию может быть незначительным, соответственно, им можно пренебречь.

Исходя из конструкции выбранного ранее кабеля, решено не учитывать следующие факторы разрушения изоляционного материала:

1. Влажность окружающей среды, так как в кабеле имеются водоблокирующие ленты, препятствующие увлажнению кабелей, а также известно, что полиэтилен обладает относительно низким влагопоглощением;

2. Ультрафиолетовое излучение, так как оно оказывает разрушающее воздействие исключительно на поверхность кабеля, то есть на его оболочку, не повреждая при этом рабочую изоляцию, расположенную в кабеле так, что она защищена от воздействия внешнего солнечного излучения;

3. Химические воздействия решено не рассматривать отдельно, так как все химические вещества могут быть в объеме изоляции в небольшом количестве или образовываться в результате разрушения изоляционного материала, следовательно, будут определяться процессами термической деструкции, вызываемой нагревом токопроводящей жилы в режиме эксплуатации кабеля;

4. Механические воздействия выражаются в изгибах (при прокладке), сжатиях и растяжениях кабелей, вызванных перепадами температуры и смещением грунта (при прокладке в земле);

5. Радиация оказывает воздействие на диэлектрик только на специализированных объектах, например, на АЭС, однако целью исследования является разработка системы определения остаточного ресурса для кабелей общего назначения, применяемых в промышленности.

Таким образом, исходя из анализа конструкции кабелей и воздействий, которым их изоляция может подвергаться, достаточно учитывать в процессе старения воздействия температуры и частичных разрядов, вызываемых наличием электрического поля высокой напряженности.

## **2.5 Разработка математической модели для прогнозирования остаточного ресурса**

За основу расчета остаточного ресурса была взята существующая модель старения изоляции в упрощенном виде:

$$\tau_{\text{сл}} = AE^{-n} \exp \cdot \frac{W_a}{kT} \quad (13)$$

Согласно приведенным выше заключениям, срок службы изоляции определяется мощностью частичных разрядов и скоростью химических реакций при термической и термоокислительной деструкции изоляционного материала, определяемой законом С. А. Аррениуса.

Представление формулы с учетом вероятности пробоя изоляции:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp \left( -\frac{W_a}{kT} \right)} \quad (14)$$

где  $N_t$  — количество молекул вещества в единице объема в данный момент времени,  $N_0$  — количество молекул вещества в единице объема до начала разрушения, принято  $N_t / N_0 = 0,645$ ,  $B$  — константа,  $E$  — напряженность

электрического поля,  $n$  — показатель степени, зависящий от типа и структуры материала,  $Kt(T) = K_0 \cdot e(-W_a/kT)$  — коэффициент скорости химических реакций при температуре в данный момент времени,  $K_0$  — константа скорости реакции закона Аррениуса,  $W_a$  — энергия активации,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура в Кельвинах,  $c$  — умножающий коэффициент, определенный синергизмом воздействия температуры и электрического поля.

При этом для расчета остаточного ресурса необходимо производить расчет количества неразрушенных молекул материала в заданном объеме вещества с целью определения степени его деградации. Количество неразрушенных молекул в данный момент времени при неизменных напряженности и температуре будет рассчитываться по формуле:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{kT})} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{kT})} \quad (15)$$

Учитывая условие, что с течением времени напряженность электрического поля и температура, как правило, хаотично меняются в условиях эксплуатации, необходимо производить расчет с разбивкой по времени (например, один раз в секунду). Учитывая, что функции изменения напряженности и температуры хаотичны, предлагается производить расчет по формуле:

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt \quad (16)$$

где  $v(t)$  — функция скорости разрушения материала под совокупным воздействием факторов, разрушающих изоляцию, которую можно определить по формуле:

$$v(t) = -\frac{dN}{dt} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp(-\frac{W_a}{kT})} \quad (17)$$

Далее, для решения задачи прогнозирования износа изоляции, требуется произвести экстраполяцию функции  $Nt(t)$  по данным, накопленным в течение определенного времени. Учитывая цикличность процессов, происходящих в электроэнергетической системе, предполагается, что функция сохранит экспоненциальный характер.

### 3. Расчет силового кабеля с пластмассовой изоляцией

#### 3.1 Электрический расчет

Выбор номинального сечения и основных геометрических параметров ТПЖ

По заданию нужно спроектировать кабельную линию для передачи мощности  $P = 250 \text{ МВА}$  на напряжение  $U_n = 20 \text{ кВ}$ .

Фазный ток при заданном напряжении и мощности:

$$I_\phi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 7,518 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (18)$$

Номинальное сечение жилы  $S_n$  рассчитывается исходя из экономической плотности тока:

$$S_n = \frac{I_\phi}{J_\phi} = \frac{7,518 \cdot 10^3}{3,1} = 2425 \text{ мм}^2 \quad (19)$$

где  $J_\phi = 3,1 \text{ А/мм}^2$  для медной жилы – экономическая плотность тока (при продолжительности работы кабеля больше 3000-5000 ч).

По ГОСТ 22483-2012 «Жилы токопроводящие медные и алюминиевые для кабелей, проводов и шнуров» самое максимальное сечение жилы  $1000 \text{ мм}^2$ . Поэтому, для возможности спроектировать кабельную линию, для передачи

заданной мощности разделим передаваемую нагрузку по двум параллельным линиям, как показано на рисунке 5.

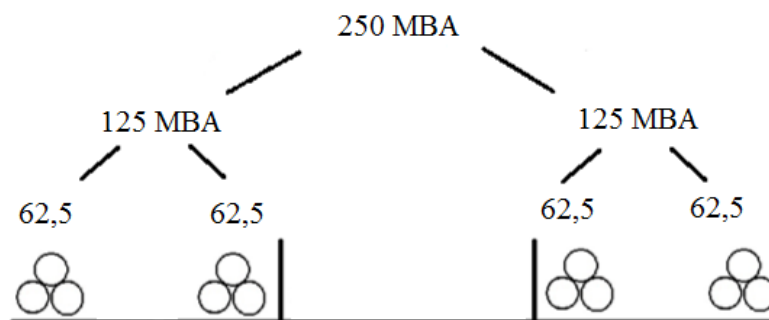


Рисунок 10 – Разделение нагрузки на две линии

Расщепляем фазу на две кабельные линии, в которой будут три кабеля на номинальную мощность 62,5 МВА. С учетом перераспределения нагрузки 62,5 МВА на две фазы пересчитываем фазовый ток для одного кабеля.

$$I_{\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 1,879 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (20)$$

Номинальное сечение жилы:

$$S_n = \frac{I_{\phi}}{J_{\phi}} = \frac{1,879 \cdot 10^3}{3,1} = 606,257 \text{ мм}^2 \quad (21)$$

По ГОСТ 22483-2012 «Жилы токопроводящие медные и алюминиевые для кабелей, проводов и шнуров» выбираем номинальное сечение жилы 630 мм<sup>2</sup>

Сечение экрана было выбрано в соответствии с ГОСТ 55025-2012 пункт 5.2.1. Номинальное сечение медного экрана в одножильных кабелях и трехжильных кабелях с секторными жилами и суммарное сечение медных экранов, наложенных на каждую изолированную круглую жилу в трехжильных кабелях, должно быть не менее 16 мм<sup>2</sup> для кабелей с жилами номинальным сечением 16-120 мм<sup>2</sup>, не менее 25мм<sup>2</sup> - для кабелей с жилами номинальным сечением 150-300 мм<sup>2</sup> и не менее 35 мм<sup>2</sup> - для кабелей с жилой

номинальным сечением 400 мм<sup>2</sup> и более. Следовательно выбираем экран 35 мм<sup>2</sup>.

Таблица 1 - Основные технические характеристики ПвВнг(А)-LS 1х630/35

Вид климатического исполнения:	В
Категория размещения:	1-5 по ГОСТ 15150.
Класс пожарной опасности:	ГОСТ 31565-2012:П16.8.2.2.2.
Номинальная рабочая частота, Гц	50
Диапазон рабочих температур	от -50 до +50 градусов Цельсия.
Максимальная допустимая температура жилы	длительно до 90 °С в аварийном режиме 105 °С в режиме КЗ - 250 °С
Предельно-допустимая температура экрана в режиме короткого замыкания, до 5 сек:	350 °С
Продолжительность работы кабеля в режиме перегрузки, не более, ч: в год ( за весь срок службы)	100 ( 1000 )
Кабель может быть проложен без предварительного подогрева при температуре, не ниже:	минус 15 °С
Минимальный радиус изгиба (или при использовании спец шаблонов) не менее, наружных диаметров	15 ( 7,5 )

По конструкции жила относится ко 2 классу гибкости. Для принятого уплотненного сечения медных жил по ГОСТ 22483-77 минимальное количество проволок в жиле = 53. Выбираем систему нормальную систему скрутки (все проволоки одного диаметра) правильная (повивная) скрутка с 5 проволоками в центре,  $N = 5 + 11 + 17 + 23 = 56$ , что соответствует 5-ой форме скрутки с количеством повивов равным 4.

Сечение одной проволоки:

$$S_{np} = \frac{S_n}{N} = \frac{630}{56} = 11,25 \text{ мм}^2 \quad (22)$$

Диаметр проволоки:

$$d_{np} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{np}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,25}{3,14}} = 3,785 \text{ мм} \quad (23)$$

Диаметр скрученной жилы:

$$D_{жс} = (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 4 + 0,7) \cdot 3,785 = 32,929 \text{ мм} \quad (24)$$

Коэффициент заполнения жилы:

$$f = \left[ \frac{(3n + 2)n}{(2n + 0,7)^2} \right] = \left[ \frac{(3 \cdot 4 + 2) \cdot 4}{(2 \cdot 4 + 0,7)^2} \right] = 0,74 \quad (25)$$

Принимаем кратность шага скрутки по каждому повиву  $m_2 = 18$ ;  $m_3 = 16$ ;  $m_4 = 15$ .

Диаметр по каждому повиву:

$$\begin{aligned} D_1 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 1 + 0,7) \cdot 4,265 = 10,22 \text{ мм}^2 \\ D_2 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 2 + 0,7) \cdot 4,265 = 17,79 \text{ мм}^2 \\ D_3 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 3 + 0,7) \cdot 4,265 = 25,36 \text{ мм}^2 \\ D_4 &= D_{жс} = 32,929 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

Коэффициент укрутки каждого повива:

$$\begin{aligned} k_{y2} &= \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{18^2}} = 1,015 \\ k_{y3} &= \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{16^2}} = 1,019 \\ k_{y4} &= \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{15^2}} = 1,022 \end{aligned} \quad (27)$$

Общий коэффициент укрутки:

$$k_{y.об} = \frac{5 + 11 \cdot 1,015 + 17 \cdot 1,019 + 23 \cdot 1,022}{5 + 11 + 17 + 23} = 1,021 \quad (28)$$

Принимаем коэффициент уплотнения ( $\eta$ ) равный 0,9 (уплотнение будем выполнять по внешнему диаметру).

Сечение уплотненной жилы равно:

$$S_y = \frac{S_n}{\eta} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ мм}^2 \quad (29)$$

Диаметр уплотненной жилы равен:

$$D_{жс} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_y}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 700}{3,14}} = 29,86 \text{ мм} \quad (30)$$

По ГОСТ 22483-2012 приложению С «Руководство по предельным размерам круглых жил» минимальный и максимальный диаметры круглых многопроволочных уплотненных жил из меди составляет для сечение 630 мм<sup>2</sup> 28,7-32,5 мм.

Таблица 2 - Диаметры круглых многопроволочных уплотненных жил из меди



Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Диаметр круглых многопроволочных уплотненных жил (класс 2), мм	
	минимальный	максимальный
10	3,6	4,0
16	4,6	5,2
25	5,6	6,5
35	6,6	7,5
50	7,7	8,6
70	9,3	10,2
95	11,0	12,0
120	12,3	13,5
150	13,7	15,0
185	15,3	16,8
240	17,6	19,2
300	19,7	21,6
400	22,3	24,6
500	25,3	27,6
625	28,6	32,4
630	28,7	32,5

### 3.1.2 Выбор толщины экрана токопроводящей жилы

В силовых кабелях экраны используются для выравнивания напряженности электрического поля. Они позволяют лучше шунтировать поры и другие дефекты у поверхности жил.

Экран из электропроводящего сшитого полиэтилена, накладываемый на токопроводящую жилу, сглаживает неровности на ее поверхности, способствуя образованию радиального электрического поля в толщине изоляции.

Поверх каждой токопроводящей жилы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена должен быть экструдированный экран из электропроводящей сшитой полимерной композиции толщиной  $(0,6 \pm 0,3)$  мм. Для кабелей с круглыми токопроводящими жилами номинальным сечением 300 мм и более и для кабелей с токопроводящими жилами секторной формы номинальным

сечением 95-400 толщина экструдированного электропроводящего экрана должна быть  $(0,9 \pm 0,3)$  мм.

Примем толщину экрана по жиле:

$$\Delta_{\text{эжс}} = 1 \text{ мм.}$$

### 3.1.3 Расчет электрической изоляции кабеля

Толщина изоляции для кабелей с пластмассовой изоляцией на среднее напряжение рассчитывается исходя из средней напряженности электрического поля. Для сшитого полиэтилена для  $U_{\text{ном}} = 20 \text{ кВ}$ , средняя напряженность электрического поля в изоляции  $E_{\text{ср}} = 2,3 \text{ кВ / мм}$ .

Толщина изоляции на фазное напряжение:

$$U_{\text{р.пер.}} = \frac{U_{\phi}}{E_{\text{ср}}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 2,3} = 5,02 \text{ мм} \quad (31)$$

В соответствии с требованиями ГОСТ 55025-2012 для кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 20 кВ принимаем значение толщины изоляции равное:  $\Delta_{\text{из}} = 5,5 \text{ мм}$ .

Таблица 3 – Номинальная толщина от сечения жилы

Номинальное сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Номинальная толщина изоляции из сшитого полиэтилена, мм					
	Номинальное напряжение кабеля, кВ					
	6	10	15	20	30	35
35-185	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0	8,5
240	2,6					
300	2,8					
400	3,0					
500-1600	3,2					

Диаметр и радиус экранированной жилы:

$$D_{\text{эжс}} = D_{\text{жс}} + 2 \cdot \Delta_{\text{эжс}} = 29,854 + 2 \cdot 1 = 31,854 \text{ мм}$$

$$r_{\text{эж}} = \frac{D_{\text{эж}}}{2} = \frac{31,854}{2} = 15,927 \text{ мм} \quad (32)$$

Диаметр и радиус по изоляции:

$$\begin{aligned} R_{\text{из}} &= r_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} = 15,927 + 5,5 = 21,427 \text{ мм} \\ D_{\text{из}} &= 2 \cdot R_{\text{из}} = 2 \cdot 21,427 = 42,854 \text{ мм} \end{aligned} \quad (33)$$

Расчетная максимальная напряженность электрического поля:

$$E_{\text{махр}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{эж}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{из}}}{r_{\text{эж}}}\right)} = \frac{20 \cdot 10^3}{15,927 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,233 \cdot 10^3 \text{ В / мм} \quad (34)$$

В соответствии с пунктом 5.2.2.12 ГОСТ 55025-2012 уровень пробивной напряженности у электропроводящего экрана поверх токопроводящей жилы после электрохимического старения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в воде должен быть не менее 23 кВ/мм, а размер водного триинга - не более 500 мкм. Значения пробивной напряженности у экрана по жиле кабелей исполнения "нг(...)-LS", "нг(...)-HF" должны быть указаны в технических условиях на кабели конкретных марок.

По ГОСТ 55025-2012 п 5.2.19 поверх изоляции из сшитого полиэтилена должен быть экструдированный экран из электропроводящей сшитой полимерной композиции толщиной  $(0,6 \pm 0,3 \text{ мм})$ . Принимает толщину экрана по изоляции 0,6 мм.

$$\Delta_{\text{эи}} = 0,6 \text{ мм}$$

Диаметр и радиус изолированной жилы с экраном:

$$\begin{aligned} R_{\text{эи}} &= R_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} = 21,427 + 0,6 = 22,027 \text{ мм} \\ D_{\text{эи}} &= 2 \cdot R_{\text{эи}} = 2 \cdot 22,027 = 44,054 \text{ мм} \end{aligned} \quad (35)$$

### 3.1.4 Оценка слабых мест

В кабельных изделиях с пластмассовой изоляцией могут образовываться воздушные включения различных форм и размеров. Минимальное значение электрической прочности изоляции определяется прочностью слабых мест, к которым относятся воздушные включения. Электрическая прочность включений связана с их геометрическими размерами и внутренним давлением. Для оценки слабых мест выполним расчет напряженности электрического поля, возникающего в воздушной поре определенного размера и в определенной толщине изоляции.

Напряженность внутри включения рассчитывается по формуле:

$$E_{\epsilon} = \frac{U_H}{r_{\epsilon} \cdot \epsilon_{\epsilon} \cdot \left[ \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{r_{\epsilon}}{r_{жс}}\right) + \frac{1}{\epsilon_{\epsilon}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\epsilon} + \Delta_{\epsilon}}{r_{\epsilon}}\right) + \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{\epsilon} + \Delta_{\epsilon}}\right) \right]} \quad (36)$$

где  $\epsilon_{\epsilon} = 1.00057$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,

$\epsilon_0 = 2.28$  – диэлектрическая проницаемость ПЭ.

Толщина пор:

$$\Delta_{\epsilon 1} = 0,06 \text{ мм}, \quad \Delta_{\epsilon 2} = 0,2 \text{ мм}, \quad \Delta_{\epsilon 3} = 1 \text{ мм}, \quad \Delta_{\epsilon 4} = 4 \text{ мм}.$$

Расстояние до поры:

$$\begin{aligned} r_{в1} &= \frac{D_{эж}}{2} = 15,061; \\ r_{в2} &= r_{в1} + 4 = 19,061; \\ r_{в3} &= r_{в2} + 4 = 23,061; \\ r_{в4} &= \frac{D_{из}}{2} = 20,561 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (37)$$

Проверяем изменение напряженности в зависимости от размер воздушного включения при постоянном расстоянии воздушной поры в пространстве изоляции.

Таблица 4 – Электрическая прочность воздуха при толщине поры

Епрв, МВ/мм	3.6	4.5	5.3	5.9	7.4	10.7	12,5
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------

$\Delta_b$ , мм	4	1	0,6	0,5	0,2	0,08	0,06
-----------------	---	---	-----	-----	-----	------	------

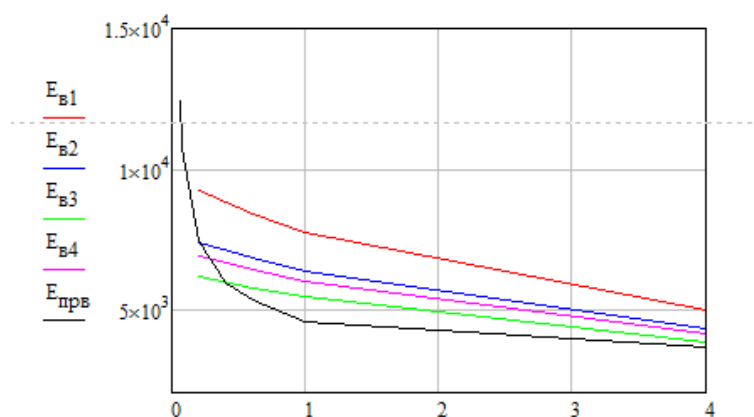


Рисунок 11 - Графики изменения напряженности в воздушной поре в зависимости от толщины поры и расстояния до нее

Из полученных графиков видно, что при толщине поры  $\Delta_b > 0,5 \text{ мм}$  напряженность в поля в поре становится выше электрической прочности воздуха, что приведет к пробое изоляции. При производстве кабеля толщина воздушных включений в изоляции не должна превышать 0,5 мм.

### 3.1.5 Выбор экрана по изоляции и кабельной оболочки

Для удобства расчета приведу конструктивные элементы для данного кабеля.

Поверх электропроводящего экрана по изоляции из сшитой полимерной композиции жил одножильных и трехжильных кабелей с жилами круглой формы, а также поверх сердечника кабелей с секторными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена должен быть наложен обмоткой слой толщиной не менее 0,2 мм из ленты или лент электропроводящей бумаги или электропроводящей синтетической ленты.

$$\Delta_{л.1} = 0,2 \text{ мм.}$$

Диаметр и радиус по первому разделительному слою:

$$\begin{aligned}
R_{c1} &= R_{\text{эи}} + \Delta_{\text{л1}} = 22,027 + 0,2 = 22,227 \text{ мм} \\
D_{c1} &= 2 \cdot R_{c1} = 2 \cdot 22,227 = 44,454 \text{ мм}
\end{aligned}
\tag{38}$$

Повив из медных проволок номинальным диаметром 0,7-2,0 мм, поверх которых спирально наложена медная лента толщиной не менее 0,1 мм и шириной не менее 8 мм.

Далее накладываем экран из медных проволок, скрепленных медной лентой. По ГОСТ Р 55025-2012 диаметр проволок должен быть 0,7 – 2,0 мм. Поверх медных проволок спирально накладывается медная лента номинальной толщиной не менее 0,1 мм и шириной не менее 8 мм в стык.

Примем диаметр проволоки 1 мм и толщину ленты 0,5 мм.

Радиус и диаметр кабеля будет:

$$\begin{aligned}
R_{\text{э}} &= R_{c1} + d_{\text{пр}} + \Delta_{\text{л}} = 22,227 + 1 + 0,5 = 23,727 \text{ мм} \\
D_{\text{э}} &= 2 \cdot R_{\text{э}} = 2 \cdot 24,221 = 47,454 \text{ мм}
\end{aligned}
\tag{39}$$

Чтобы оболочка не прилипала к медному экрану, поверх ленты накладывается разделительный слой из стеклоленты номинальной толщиной 0,2 мм.

$$\begin{aligned}
R_{c2} &= R_{\text{э}} + \Delta_{\text{сл2}} = 23,727 + 0,2 = 23,927 \text{ мм} \\
D_{c2} &= 2 \cdot R_{c2} = 2 \cdot 23,927 = 47,854 \text{ мм}
\end{aligned}
\tag{40}$$

Внутренняя оболочка - из поливинилхлоридного пластика пониженной пожароопасности. По ГОСТ Р 55025-2012 п 5.2.1.12 принимаем толщину оболочки 1,8 мм.

$$\begin{aligned}
R_{c3} &= R_{c2} + \Delta_{\text{сл}} = 23,927 + 1,8 = 25,727 \text{ мм} \\
D_{c3} &= 2 \cdot R_{c3} = 2 \cdot 25,727 = 51,454 \text{ мм}
\end{aligned}
\tag{41}$$

Поверх внутренней оболочки накладывается термический барьер из двух стеклолент номинальной толщиной 0,2 мм.

$$\begin{aligned}
R_{c4} &= R_{c3} + 2\Delta_{\text{тер}} = 25,727 + 2 \cdot 0,2 = 26,127 \text{ мм} \\
D_{c4} &= 2 \cdot R_{c4} = 2 \cdot 26,127 = 52,254 \text{ мм}
\end{aligned}
\tag{42}$$

Последним этапом является наложение наружной оболочки из поливинилхлоридного пластика пониженной пожароопасности и низкой токсичностью продуктов при горении и тлении. По ГОСТ Р 55025-2012 номинальная толщина, при данном диаметре равна 2,9 мм.

Таблица 5 – Значения толщин оболочки в соответствии ГОСТ

Диаметр кабеля под наружной оболочкой	Номинальная толщина наружной оболочки
До 40 включ.	2,5
Св. 40 " 50 "	2,7
" 50 " 60 "	2,9
" 60	3,5

$$\begin{aligned}
 R_k &= R_{cl4} + \Delta_{об} = 26,127 + 2,9 = 29,027 \text{ мм} \\
 D_k &= 2 \cdot R_k = 2 \cdot 29,027 = 58,054 \text{ мм}
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

По результатам расчетов можно увидеть, что значение диаметра кабеля под наружной оболочкой сошлось со значениями по ГОСТ, а именно вошло в промежуток 50-60 мм, для номинальной толщины наружной оболочки равно 2,9 мм. Исходя из этого можно сделать вывод, что расчет произведен верно.

### 3.2 Тепловой расчет

#### Расчет электрических характеристик

Электрическими характеристиками силовых кабелей являются:

- Сопротивление токопроводящей жилы (ТПЖ);
- Сопротивление изоляции;
- Емкость изоляции;

Расчет характеристик заключается в определении сопротивления жилы, изоляции и емкости кабеля в рабочем диапазоне температур.

### 3.2.1 Расчет сопротивления токопроводящей жилы

Основным источником тепла является ТПЖ.

Найдем сопротивление ТПЖ постоянному току при 15 °С:

$$R_{ж0} = \rho_{Cu} \cdot \frac{1}{S_n \cdot 10^{-6}} \cdot k_y = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{630 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,017 = 2,778 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad (44)$$

где  $\rho_{cu}$  - удельное сопротивление материала жилы ( $\rho_{cu} = 1,724 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ );

$k_{y.об}$  - общий коэффициент укрутки.

Согласно ГОСТ 22483-2012 пункт 5.2.1 таблица 4 электрическое сопротивление для 630 мм<sup>2</sup> не должно превышать 0,153 Ом.

Сопротивление ТПЖ постоянному току при рабочей температуре:

$$R_t = R_{ж0} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (t_{\max} - 20)] = 2,778 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (90 - 20)] = 3,536 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

где  $\alpha_t$  - температурный коэффициент меди ( $\alpha_t = 0,0039 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$t_{\max}$  - длительно допустимая температура нагрева жил (90 °С).

Увеличение сопротивления токопроводящей жилы на переменном токе по сравнению с сопротивлением на постоянном при рабочей температуре будет равным:

$$R_T = R_{t-} \cdot (1 + y_n + y_{\delta})$$

где  $y_n, y_{\delta}$  - коэффициенты, характеризующие увеличение сопротивления жилы из-за поверхностного эффекта и эффекта близости. Данные коэффициенты учитывают форму, размеры, конструкцию и взаимное расположение ТПЖ.

Следовательно, далее находим сопротивление жилы с учетом эффекта близости и поверхностного эффекта.

Для промышленной частоты параметр  $x$  определяется как:

$$x_n = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{k_n}{R_{ж0}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,778 \cdot 10^{-5}}} = 2,133 \quad (46)$$



где  $k_n$  - коэффициент зависящий от конструкции жилы, и для круглой многопроволочной жилы равен 1.

Поверхностный эффект (вытеснение напряженности поля жилы кабеля за счет электромагнитного поля фазы) находится по формуле:

$$y_n = \frac{x_n^4}{192 + 0,8 \cdot x_n^4} = \frac{2,133^4}{192 + 0,8 \cdot 2,12^4} = 0,182 \quad (47)$$

Эффект близости (влияние электромагнитного поля фаз кабеля друг на друга), находится из соотношения:

$$y_{\bar{o}} \rightarrow y_n^I \rightarrow x \rightarrow k$$

Для расположения одножильного кабеля треугольником, выражение коэффициента близости будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} y_{\bar{o}} &= y_n \cdot \left(\frac{D_{\text{эжс}}}{a}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{D_{\text{эжс}}}{a}\right)^2 + \frac{1,18}{0,27}\right] = \\ &= 0,182 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 + \frac{1,18}{y_{n2} + 0,27}\right] = 0,052 \end{aligned} \quad (48)$$

где  $a$  - расстояние между центрами соседних жил, равное диаметру кабеля.

Найдем коэффициент  $y_n^I$  учитывающий эффект близости.

$$x_{\bar{o}} = 0,01124 \sqrt{\frac{k_{\bar{o}}}{R_{\text{жс}0}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{0,8}{0,0016}} = 2,11 \quad (49)$$

где  $k_{\bar{o}}$  - коэффициент, зависящий от конструкции жилы, и для круглой многопроволочной жилы для эффекта близости равен 0,8.

Сопротивление жилы с учетом коэффициента близости и поверхностного эффекта будет равен:

$$R_T = R_l \cdot (1 + y_n + y_{\bar{o}}) = 3,536 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0,182 + 0,052) = 4,289 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (50)$$

### 3.2.2 Расчет сопротивления изоляции

Сопротивление изоляции для одножильного кабеля переменного тока при комнатной температуре:

$$R_{из} = \frac{\rho_v \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{эжс}}\right) = \frac{10^{15} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 4,721 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{км} \quad (51)$$

где  $\rho_v = 10^{15}$  - удельное сопротивление материала изоляции (сшитого полиэтилена).

Сопротивление одножильного кабеля переменного тока при рабочей температуре:

$$R_{изт} = \frac{\rho_v \cdot e^{-\alpha_{из} \cdot t_p} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{эжс}}\right) = \frac{10^{15} \cdot e^{-0,016 \cdot 90} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 1,119 \cdot 10^4 \text{ МОм} \cdot \text{км}$$

где  $\alpha_t$  - температурный коэффициент изоляции;

$t_{\max}$  - длительно допустимая температура нагрева жил (90 °C).

### 3.2.3 Расчет рабочей емкости

Электрическая емкость изоляции является также важной характеристикой изоляции. Зависит от геометрических размеров кабеля, количества и формы токопроводящих жил. Величина рабочей емкости связана с однородностью изоляции, стабильностью ее радиальных размеров по периметру и длине, а в период эксплуатации – от интенсивности процессов старения. Для большого ряда кабелей емкость является стабильностью технологических процессов.

Электрическая емкость изоляции для одножильного кабеля с однородной изоляцией:

$$C = \frac{\varepsilon_{нэ} \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{эжс}}\right)} = \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,682 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{м}, \quad (53)$$

где  $\varepsilon_{нэ} = 2.5$  - диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена.

### 3.2.4. Тепловой расчет

При передаче по кабелю электромагнитной энергии, характеризующейся достаточно большой мощностью, из-за потерь энергии в жиле, изоляции, оболочках, в кабеле выделяется тепло, и его элементы нагреваются. Во избежание перегрева кабеля сверх допустимых норм производят тепловой расчет, который позволяет определить для выбранной конструкции кабеля и заданных условий эксплуатации максимально допустимую нагрузку.

Нагрузка силовых кабелей зависит от допустимой температуры нагрева ТПЖ, а также условий теплоотвода. Длительно допустимую нагрузку можно найти путем составления уравнения теплового баланса для кабеля в установившемся тепловом режиме на основе теплового закона Ома.

Для определения допустимой максимальной токовой нагрузки составим тепловую схему замещения кабеля напряжением 20 кВ, нанеся на нее все источники тепла, которые учитываются при расчете для данного кабеля, термические сопротивления конструктивных элементов кабеля и окружающей среды. Источниками тепла в кабеле являются диэлектрические потери в ТПЖ, изоляции в металлическом экране.

Диэлектрические потери в изоляции связаны с реализацией медленных видов поляризации и электропроводности в изоляции кабеля.

Диэлектрические потери в изоляции:

$$P_{из} = U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = \left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 4,682 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,071 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

где  $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$  - тангенс угла диэлектрических потерь для СПЭ, постоянный по всей толщине изоляции;

$\omega = 2\pi f = 314$  - угловая частота.

Далее посчитаем потери в металлическом экране. Переменное магнитное поле, возникающее при протекании переменного тока по жилам кабелей, приводит к потерям энергии в металлических оболочках (экранах),

что объясняется наличием вихревых токов и продольных ЭДС, наводимых взаимной индукцией жил и экрана, и обусловленных ими продольными токами в замкнутых металлических оболочках. Потери в оболочках, экранах проявляются только в одножильных кабелях и связаны с величиной электрического сопротивления этих элементов и взаимным расположением кабелей относительно друг друга (в плоскости или треугольнике).

Сечение экрана определяется по току короткого замыкания, при котором ток в экране становится равен току в фазе.

$$I_{кз} = K_{\vartheta} \cdot \frac{F_{\vartheta}}{\sqrt{t_k}} \quad (54)$$

где  $I_{кз}=6,1$  кА – допустимый ток однофазного короткого замыкания для кабелей с изоляцией из СПЭ на 20 кВ;

Таблица 6 – Допустимый ток короткого замыкания ИК для медной жилы и экрана

$F_{\vartheta}$ или $F_{ж}$ , мм <sup>2</sup>	$I_{к}$ , кА	
	Жила	Экран
35	4,9	6,1
50	7,1	8,7
70	9,9	12,2
95	13,4	16,5
120	16,9	20,9
150	21,2	26,1
185	26,1	32,2
240	33,8	41,8
300	42,3	52,2
400	56,4	69,6

$K_9 = 0,153 \div 0,203 \text{ кА} / \text{мм}^2$  - коэффициент пропорциональности экрана;

$t_k = 1 \text{ с}$  - условное время короткого замыкания.

Сечение медного экрана:

$$S_9 = \frac{I_{кз} \cdot \sqrt{t_k}}{K_9} = \frac{6,1 \cdot \sqrt{1}}{0,153} = 39,86 \text{ мм}^2 \quad (55)$$

Согласно ГОСТ 55025-2012 номинальное сечение медного экрана в одножильных кабелях и трехжильных кабелях с секторными жилами и суммарное сечение медных экранов, наложенных на каждую изолированную круглую жилу в трехжильных кабелях, должно быть не менее  $35 \text{ мм}^2$  - для кабелей с жилой номинальным сечением более  $400 \text{ мм}^2$ . Следовательно, рассчитанное сечение проходит по условию ГОСТ.

Найдем реальное сечение экрана, для этого определим сечение одной проволоки:

$$S_{прэ} = \pi \frac{d_{мэ}^2}{4} = \pi \frac{2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2 \quad (56)$$

Количество проволок в экране:

$$n_{пр} = \frac{S_{эк}}{S_{прэ}} = \frac{35}{3,14} = 11,141 \quad (57)$$

Округляем до целого:

$$n_{пр} = 11$$

Реальное сечение экрана:

$$S_{эк} = n_{пр} \cdot S_{прэ} = 11 \cdot 3,14 = 34,54 \text{ мм}^2 \quad (58)$$

Электрическое сопротивление экрана:

$$R_{эк} = \rho_{Cu} \frac{1}{S_{эк} \cdot 10^{-6}} = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{34,54 \cdot 10^{-6}} = 4,724 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (59)$$

Взаимное индуктивное влияние:

$$X = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{a}{R_{экр}}\right) = 2 \cdot 314 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{52,742}{24,221}\right) = 4,901 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad (60)$$

Потери в различных металлических оболочках выражаются как отношение их к потерям в токопроводящей жиле:

$$y_{\text{эк}} = \frac{P_{\text{эк}}}{P_{\text{ж}}} \quad (61)$$

Индуктивное сопротивление:

$$X_m = 0,435 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}. \quad (62)$$

Коэффициенты:

$$\begin{aligned} Q &= X - \frac{X_m}{3} = 4,901 \cdot 10^{-5} - \frac{0,435 \cdot 10^{-4}}{3} = 3,451 \cdot 10^{-5} \\ N &= X + X_m = 4,901 \cdot 10^{-5} + 0,435 \cdot 10^{-4} = 9,251 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (63)$$

Коэффициент потерь для среднего кабеля при прокладке в плоскости:

$$y_{\text{об2}} = \frac{R_{\text{эк}}}{R_T} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{эк}}}{Q}\right)^2} = \frac{4,724 \cdot 10^{-4}}{3,773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{4,724 \cdot 10^{-5}}{3,451 \cdot 10^{-5}}\right)^2} = 0,063 \quad (64)$$

Коэффициенты потерь для крайних кабелей:

$$\begin{aligned} y_{\text{об1}} &= \frac{R_{\text{эк}}}{R_T} \cdot \left( \frac{0,75 \cdot N^2}{R_{\text{эк}}^2 + N^2} + \frac{0,25 \cdot Q^2}{R_{\text{эк}}^2 + Q^2} + \frac{2 \cdot R_{\text{эк}} \cdot N \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot R_{\text{эк}}^2 + N^2 \cdot R_{\text{эк}}^2 + Q^2} \right) = \\ &= \frac{4,724 \cdot 10^{-4}}{3,773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{(0,75 \cdot (9,251 \cdot 10^{-5})^2)}{(4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (9,251 \cdot 10^{-5})^2} + \\ &+ \frac{0,25 \cdot (3,451 \cdot 10^{-5})^2}{(4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (3,451 \cdot 10^{-5})^2} + \\ &+ \frac{2 \cdot 4,724 \cdot 10^{-4} \cdot 9,251 \cdot 10^{-5} \cdot 0,435 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3} \cdot (4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (9,251 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (3,451 \cdot 10^{-5})^2} = 0,346 \\ y_{\text{об3}} &= \frac{R_{\text{эк}}}{R_T} \cdot \left( \frac{0,75 \cdot N^2}{R_{\text{эк}}^2 + N^2} + \frac{0,25 \cdot Q^2}{R_{\text{эк}}^2 + Q^2} - \frac{2 \cdot R_{\text{эк}} \cdot N \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot R_{\text{эк}}^2 + N^2 \cdot R_{\text{эк}}^2 + Q^2} \right) = \\ &= \frac{4,724 \cdot 10^{-4}}{3,773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{0,75 \cdot (9,251 \cdot 10^{-5})^2}{(4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (9,251 \cdot 10^{-5})^2} + \\ &+ \frac{0,25 \cdot (3,451 \cdot 10^{-5})^2}{(4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (3,451 \cdot 10^{-5})^2} - \\ &- \frac{2 \cdot 4,724 \cdot 10^{-4} \cdot 9,251 \cdot 10^{-5} \cdot 0,435 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3} \cdot (4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (9,251 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (4,724 \cdot 10^{-4})^2 + (3,451 \cdot 10^{-5})^2} = 0,314 \end{aligned} \quad (65)$$

После нахождения диэлектрических потерь, произведем расчет тепловых сопротивлений элементов кабеля и окружающей среды. После, для установившегося режима запишем тепловой закон Ома и рассчитаем максимально допустимый ток нагрузки.

К тепловым сопротивлениям элементов кабеля относятся:

- Тепловое сопротивление изоляции  $S_{из}$ .
- Тепловое сопротивление разделительного слоя  $S_{pc1}$
- Тепловое сопротивление разделительного слоя из стеклоленты  $S_{сст}$ .
- Тепловое сопротивление внутренней оболочки  $S_{вн.об}$ .
- Тепловое сопротивление термического барьера  $S_{тб}$ .
- Тепловое сопротивление наружной оболочки  $S_{н.об}$ .
- Тепловое сопротивление окружающей среды  $S_{ср}$ .

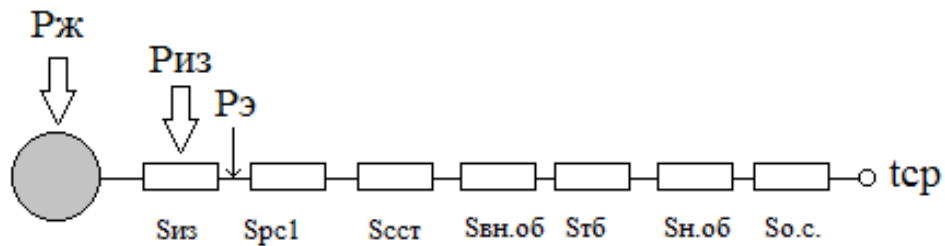


Рисунок 12 – Тепловая схема замещения кабеля

Тепловое сопротивление изоляции из сшитого ПЭ:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{эжс}}\right) = \frac{3}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 0,142 \frac{^{\circ}C}{Вт} \quad (66)$$

где  $\sigma_{из} = 3 \frac{^{\circ}C \cdot м^2}{Вт}$  - удельное термическое сопротивление для СПЭ.

Тепловое сопротивление наружной оболочки:

$$S_{н.об} = \frac{\sigma_{об}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{к}}{R_{pc4}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{28,627}{26,127}\right) = 0,073 \frac{^{\circ}C}{Вт} \quad (67)$$

где  $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  -удельное термическое сопротивление поливинилхлоридного пластика.

Тепловое сопротивление внутренней оболочки:

$$S_{вн.об} = \frac{\sigma_{об}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c3}}{R_{c2}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{25,727}{23,927}\right) = 0,048 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (68)$$

где  $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  -удельное термическое сопротивление поливинилхлоридного пластика.

Тепловое сопротивление разделительного слоя 1:

$$S_{pc1} = \frac{\sigma_{c1}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c1}}{R_{из}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{22,227}{21,821}\right) = 0,015 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (69)$$

где  $\sigma_{вл} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  -удельное термическое сопротивление электропроводящей бумаги.

Тепловое сопротивление слоя из стеклоленты :

$$S_{cct} = \frac{\sigma_{c2}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c2}}{R_{c1}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{23,92}{22,227}\right) = 0,058 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (70)$$

где  $\sigma_{вл} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$  -удельное термическое сопротивление стеклоленты

Тепловое сопротивление термического барьера:

$$S_{mб} = \frac{\sigma_{ал}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c4}}{R_{c2}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{26,127}{23,92}\right) = 0,07 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (71)$$

По условию задания, кабель прокладывается в тоннеле. Кабельные тоннели и коллекторы рекомендуется сооружать в городах и на предприятиях с уплотненной застройкой территории или при большом насыщении территории подземными инженерными коммуникациями, а также на территориях больших металлургических, машиностроительных и других предприятий. Кабели в тоннелях располагаются по конструкциям (полкам).



Геометрические размеры данных сооружений нормируются ПУЭ-7.П.2.3.122-2.3.133.

Так как, кабель в тоннеле находится на полках, то можно считать, что кабель прокладывается в воздухе, то охлаждение такого кабеля осуществляется за счет конвекции. Количество тепла, отводимое при этом с его поверхности, зависит от величин и состояния, а также от разности температур между кабелем и воздухом.

В кабельных сооружениях и других помещениях должен быть организован систематический контроль за тепловым режимом работы кабелей, температурой воздуха и работой вентиляционных устройств.

Температура воздуха внутри кабельных туннелей, каналов и шахт в летнее время должна быть не более чем на 10 °С выше температуры наружного воздуха.

Тепловое сопротивление воздуха в тоннеле:

$$S_{\epsilon} = \frac{1}{h \cdot \pi \cdot D_{\kappa} \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^{1/4}} = \frac{1}{8,2 \cdot \pi \cdot 57,254 \cdot 10^{-3} \cdot 65^{1/4}} = 0,0218 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (72)$$

где  $h$  - коэффициент конвективной теплоотдачи;

$\Delta t = t_{\text{нк}} - t_{\text{ср}} = 15^{\circ}\text{C}$  - разность температуры поверхности кабеля и температуры окружающей среды

Коэффициент конвективной теплоотдачи для кабеля диаметром от 5 до 150 мм можно рассчитать по формуле:

$$h = 4,5 \sqrt[4]{\frac{\Delta t_{\kappa}}{D_{\kappa} \cdot 10^{-1}}} = 4,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{15}{57,254 \cdot 10^{-1}}} = 5,24 \frac{\text{Вт}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2} \quad (73)$$

Определяем максимальный ток нагрузки с учетом взаимного теплового влияния фаз:

$$\begin{aligned}
J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{\text{жс}} - t_{\text{ср}}) - P_{\text{из}} \cdot (0,5S_{\text{из}} + S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})}{R_T \cdot [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об2}}) \cdot (S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})]}} = \\
&= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,00 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,063) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,968 \cdot 10^3 \text{ A} \\
J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{\text{жс}} - t_{\text{ср}}) - P_{\text{из}} \cdot (0,5S_{\text{из}} + S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})}{R_T \cdot [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об2}}) \cdot (S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})]}} = \\
&= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,0051 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,346) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,82 \cdot 10^3 \text{ A} \\
J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{\text{жс}} - t_{\text{ср}}) - P_{\text{из}} \cdot (0,5S_{\text{из}} + S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})}{R_T \cdot [S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об2}}) \cdot (S_{\text{пс1}} + S_{\text{сст}} + S_{\text{вн.об}} + S_{\text{тб}} + S_{\text{н.об}} + S_{\text{о.с.}})]}} = \\
&= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,0051 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,314) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,835 \cdot 10^3 \text{ A}
\end{aligned}$$

При групповой прокладке кабелей в тоннеле в зависимости от количества и их взаимного расположения необходимо учитывать взаимное тепловое влияние кабелей друг на друга. Т.е. необходимо корректировать значение максимального допустимого тока.

$$J_{\text{МАХ,ГР}} = k \cdot J_{\text{max}}$$

Коэффициент  $k$  для прокладки на полках с учетом циркуляции воздуха определяется по таблице 1, и равняется 0,9.

Таблица 7 - Коэффициент  $k$  для прокладки кабелей

Количество цепей			
1	2	3	
1	0,97	0,96	1
0,97	0,94	0,93	2
0,96	0,93	0,93	3
0,94	0,91	0,9	4-6

$$I_{\text{max.гр}} = 0,9 \cdot 1,968 = 1,84 \text{ A} \quad (74)$$

Определим реальную мощность, передаваемую по линии для принятых условий прокладки:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} \cdot I_{\text{max}} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,84 = 63,739 \cdot 10^3 \text{ кВт} \quad (75)$$

По условию один такой кабель должен передавать мощность равную 62,5 МВА, реальная же передаваемая мощность по линии с учетом принятых условий прокладки составляет 63,73 МВА. Условие выполняется.

В случае если реальная мощность окажется меньше нужной, то следует воспользоваться одним или несколькими методами, позволяющих повысить передаваемую мощность:

- При прокладке кабеля в земле использовать засыпной грунт с низким удельным тепловым сопротивлением;
- Применить внешнее, внутреннее или косвенное охлаждение кабеля;
- Увеличить номинальное сечение ТПЖ и провести повторно электрический и тепловой расчет кабеля.

### **3.3 Расчет остаточного ресурса при заданных условиях эксплуатации**

Для начала необходимо преобразовать формулы, выведенные в пункте разработки модели с целью подстановки в них переменных, заданных условиями эксплуатации. Учитывая экспоненциальный характер функцию можно представить в виде:

$$N = N_0 e^{b \cdot t} \quad (76)$$

где  $b$  – параметр экспоненциальной эмпирической зависимости. Определение параметров функции производится методом наименьших квадратов, суть которого заключается в сведении к минимуму расчетных значений от значений эмпирического ряда. Задача нахождения параметров функции сводится к системе уравнений линейной аппроксимации. Для этой цели уравнение логарифмируется:

$$\ln N = \ln N_0 + bt \quad (77)$$

Затем производится замена:

$$N' = \ln N \quad (78)$$

Тогда уравнение можно представить в виде:

$$N' = \ln N_0 + bt \quad (79)$$

Исходя из полученного уравнения и согласно методу наименьших квадратов, нахождение параметра  $b$  сводится к решению уравнения:

$$b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n N'_i \quad (80)$$

где  $n$  – количество эмпирических значений. После нахождения параметра необходимо рассчитать время до безотказной работы изоляции и время до ее полного износа. В одной из моделей, разобранных в теоретической части было установлено, что изоляция будет работать без отказов при разрушении до 35.5%, значит соотношение  $N_t / N_0 = 0.645$ . Тогда получим, что расчетный срок безотказной работы изоляции составит:

$$\tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,645}{b} = \frac{0,4385}{-b} \quad (81)$$

При известном расчетном сроке безотказной работы изоляции и времени в эксплуатации, остаточный срок безотказной работы можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{остбр} = \tau_{сл} - \tau_{экспл} \quad (82)$$

Для расчета времени до полного износа изоляции требуется рассчитать время до разрушения 78% материала, следовательно, расчет будет производиться исходя из условия  $N_t / N_0 = 0.22$ :

$$\tau_{сл} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{-b} \quad (83)$$

При известном расчетном сроке службы изоляции и времени в эксплуатации, остаточный ресурс можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{сл}} - \tau_{\text{экспл}} \quad (84)$$

Необходимо привести данные о температуре и напряжении с учетом суточной динамики изменения потребления электроэнергии, чтобы показать пример работы математической модели и спрогнозировать износ изоляции.

Таблица 8 Данные о температуре и напряжении кабеля для прогнозирования остаточного ресурса.

t, ч	T, C	U, кВ
1	85	10,05
2	85	10,1
3	90	10,1
4	95	10,15
5	97	10,15
6	98	10,15
7	102	10,15
8	93	10,1
9	90	10,1
10	85	10
11	90	9,95
12	91	9,9
13	95	9,9
14	102	9,85
15	90	9,8
16	100	9,8
17	93	9,85
18	90	9,9
19	95	10

20	92	10
21	93	10
22	91	9,9
23	90	10
24	90	10

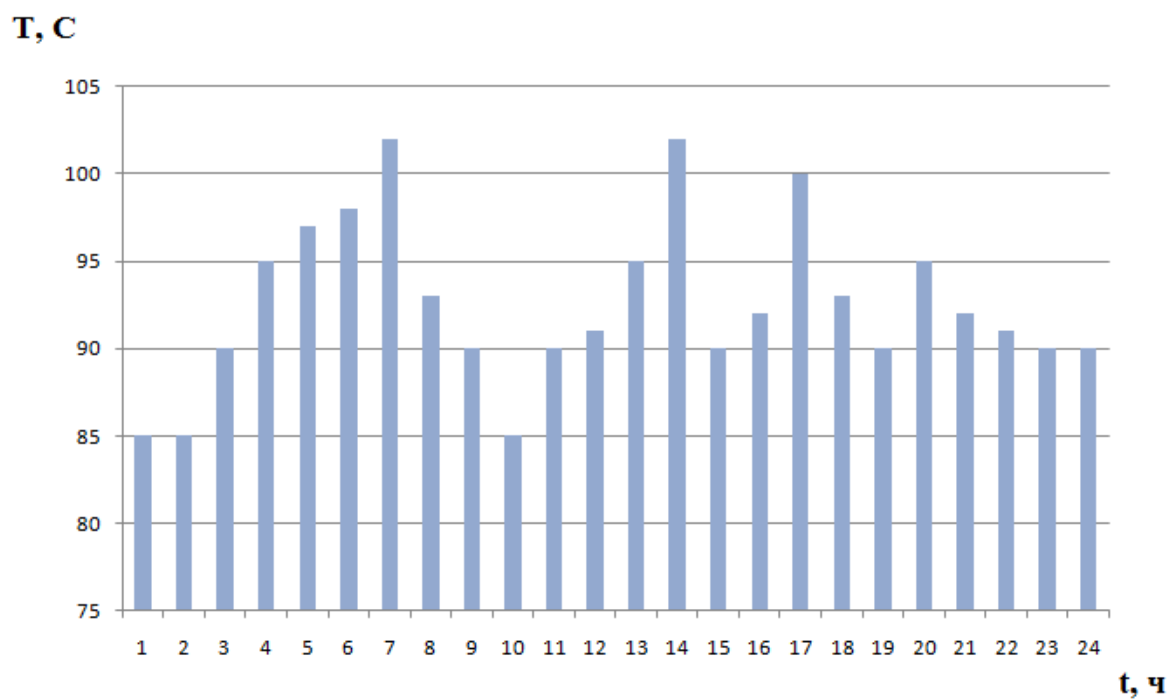


Рисунок 13 – График температуры нагрева жилы от времени эксплуатации

**U, кВ**

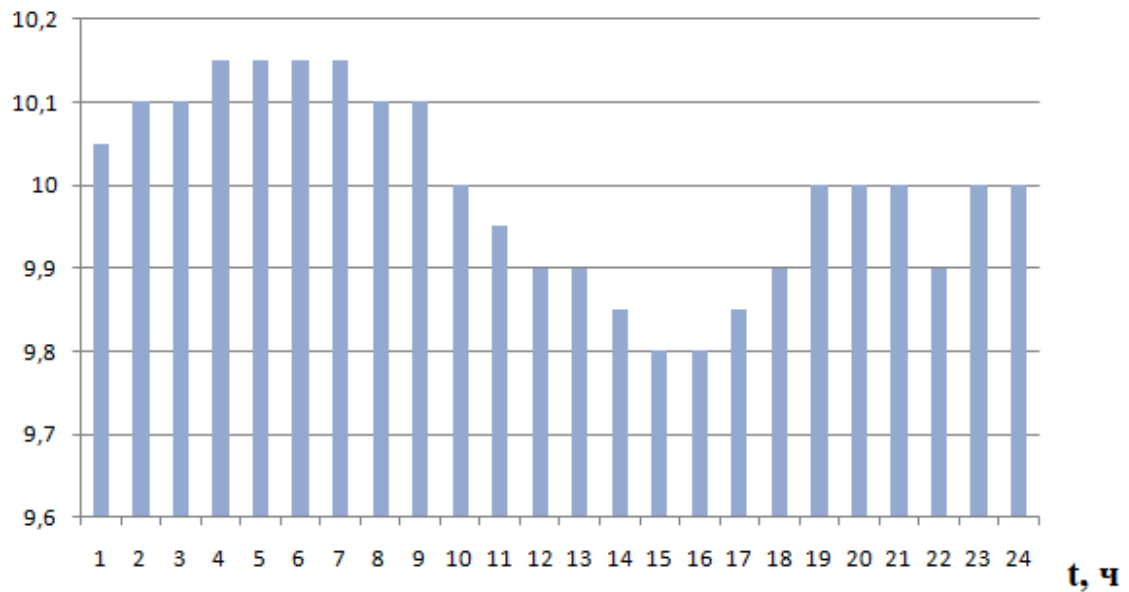


Рисунок 14 - График напряжения на изоляции кабеля

Для расчета остаточного срока службы требуется знать все параметры модели старения изоляции для определения скорости разрушения материала. Константу скорости реакции можно определить по графику Аррениуса для процесса термодеструкции полиэтилена:

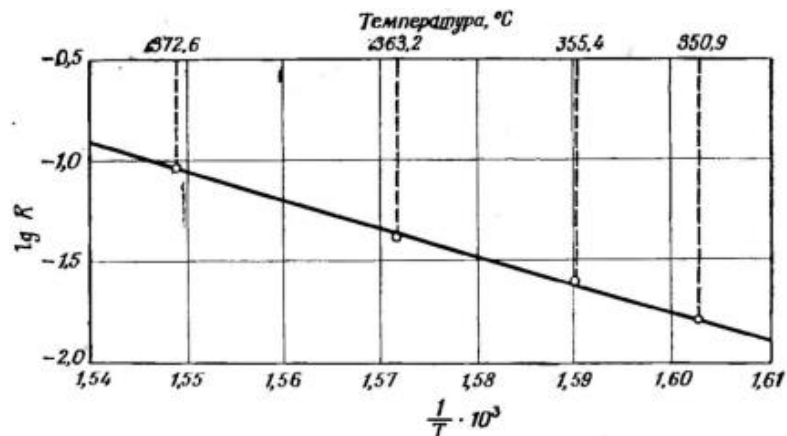


Рисунок 15 – График Аррениуса для процесса термической деструкции полиэтилена

Для определения зависимости константы скорости реакции от температуры необходимо знать уравнение прямой, представленной на

рисунке 13. Для этого нужно знать координаты двух точек, через которые проходит прямая. Примем, что прямая проходит через точки с координатами (0,001548;-1,05) и (0,00159;-1,7). Согласно уравнению прямой, проходящей через две точки, получим:

$$\frac{\frac{1}{T} - 0,001548}{0,00159 - 0,001548} = \frac{\log K_t(T) + 1,05}{-1,7 + 1,05} \quad (85)$$

Отсюда:

$$\log K_t(T) = \frac{1}{T} + 22,9 \quad (86)$$

где  $T$  – температура в Кельвинах. Однако константа скорости реакции выражена в экспоненциальной форме, значит формулу следует преобразовать:

$$\ln K_t(T) = \frac{1}{T} + 9,945 \quad (87)$$

Отсюда:

$$K_t(T) = e^{\frac{1}{T} + 9,945} \quad (88)$$

Или

$$K_t(T) = 20854 e^{\frac{1}{T}} \quad (89)$$

Также необходимо определить параметры формулы мощности частичных разрядов:

$$P_{чр} = B \cdot U^n \quad (90)$$

Параметры формулы определялись исходя из электрического расчета. Значения параметров изменялись в процессе старения, однако в модели предлагается взять усредненные значения:  $B = 5.536 \cdot 10^{-3}$  и  $n = 5$ .



Параметр  $c$ , определяющий синергизм воздействия теплового и электрического полей принят равным 0.01.  $N_0$  примем равным числу Авогадро  $6.022 \cdot 10^2$ .

Подставив полученные параметры в формулу скорости разрушения (17), получим:

$$v(t) = 0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-3} \cdot U^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}} \cdot 6.022 \cdot 10^2 \cdot e^{-0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-3} \cdot E^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}}}$$

Используя формулу ( ), графики температуры и напряжения (рисунки 11 и 12) и значения параметров (таблица 2.2) был произведен расчет и получена функция изменения количества неразрушенных молекул материала. Для полученной эмпирической функции был произведен подбор экспоненциальной расчетной функции с пакета программ Matlab.

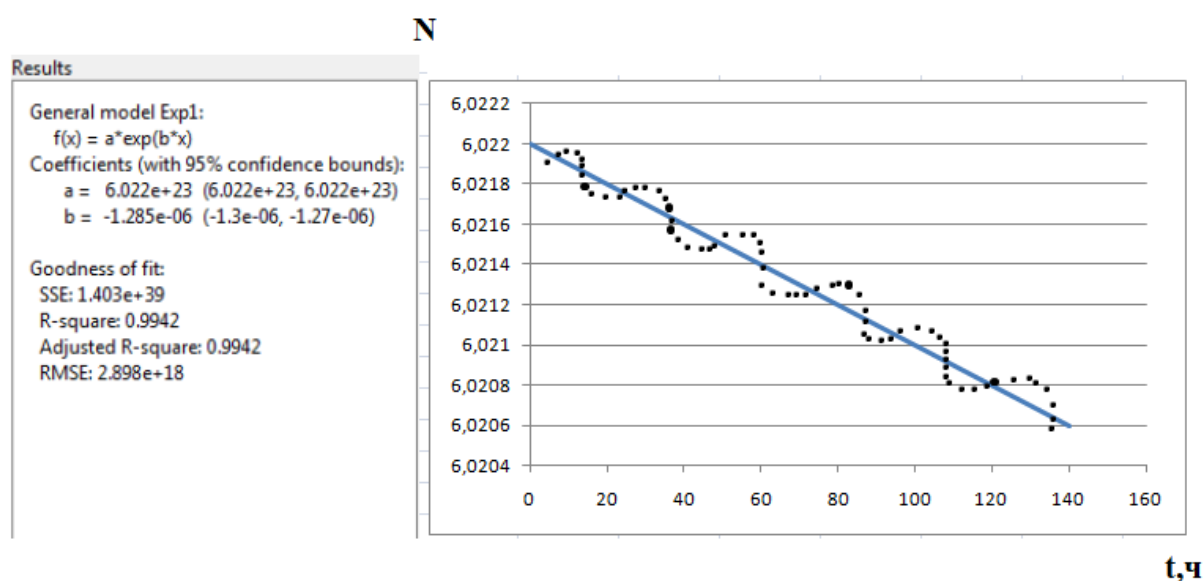


Рисунок 16 - График изменения количества неразрушенных молекул материала в процессе эксплуатации

Исходя из формулы (81), срок безотказной работы изоляции составляет:

$$\tau_{бр} = \tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{0.4385}{0.00000263} = 166730 = 19 \text{ лет} \quad (91)$$

Срок службы изоляции до ее полного износа составляет:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1.514}{0.0000059} = 302220 \text{ ч} = 34.5 \text{ лет} \quad (93)$$

Остаточный ресурс, согласно (84), равен:

$$\begin{aligned} \tau_{ост} &= \tau_{сл} - \tau_{экспл} = \\ &= 302220 - 168 = 302052 \text{ ч} = 34.4 \text{ лет} \end{aligned} \quad (94)$$

### Остаточный ресурс, лет

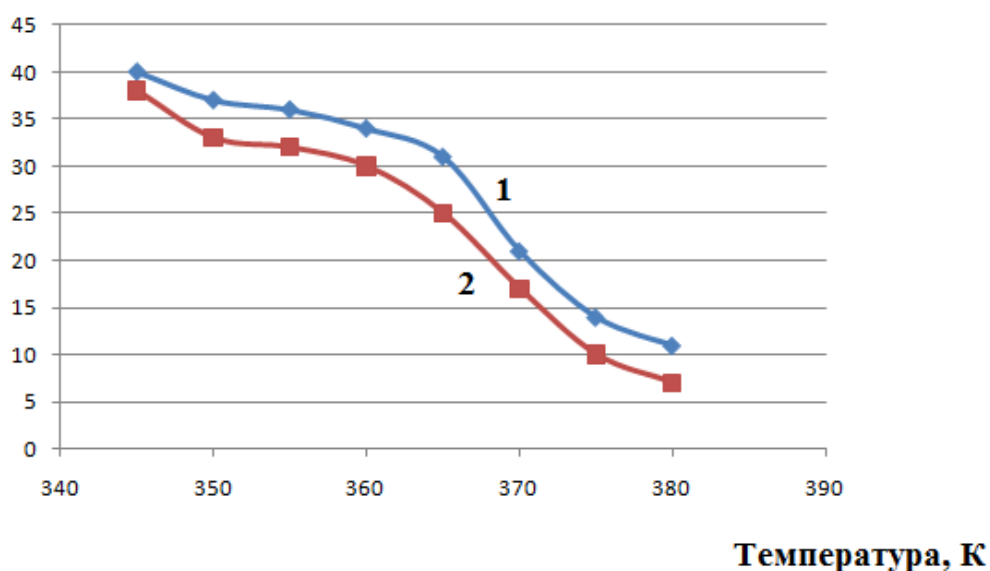


Рисунок 17 - График зависимости остаточного ресурса от эксплуатационных факторов

### Оценка погрешности расчета остаточного ресурса изоляции кабелей

Относительная погрешность расчета прогнозируемого срока службы изоляции определяется формулой:

$$\varepsilon_{\tau_{сл}} = \frac{\Delta \tau_{сл}}{\tau_{ост}} \cdot 100\% = \frac{2,752}{34,4} \cdot 100\% = 8\% \quad (95)$$

Погрешность необходимо определить в области рабочих значений измеряемых величин, которыми являются напряжение, токи в жиле и экране и температура поверхности кабеля. Исходя из полученных результатов расчета, с помощью разработанного устройства и математической модели рекомендуется оценивать сроки службы кабелей, эксплуатируемых в умеренном и холодном климате и проложенных в земле. В данном случае оцениваемая погрешность расчета срока службы изоляции составит порядка 8%.

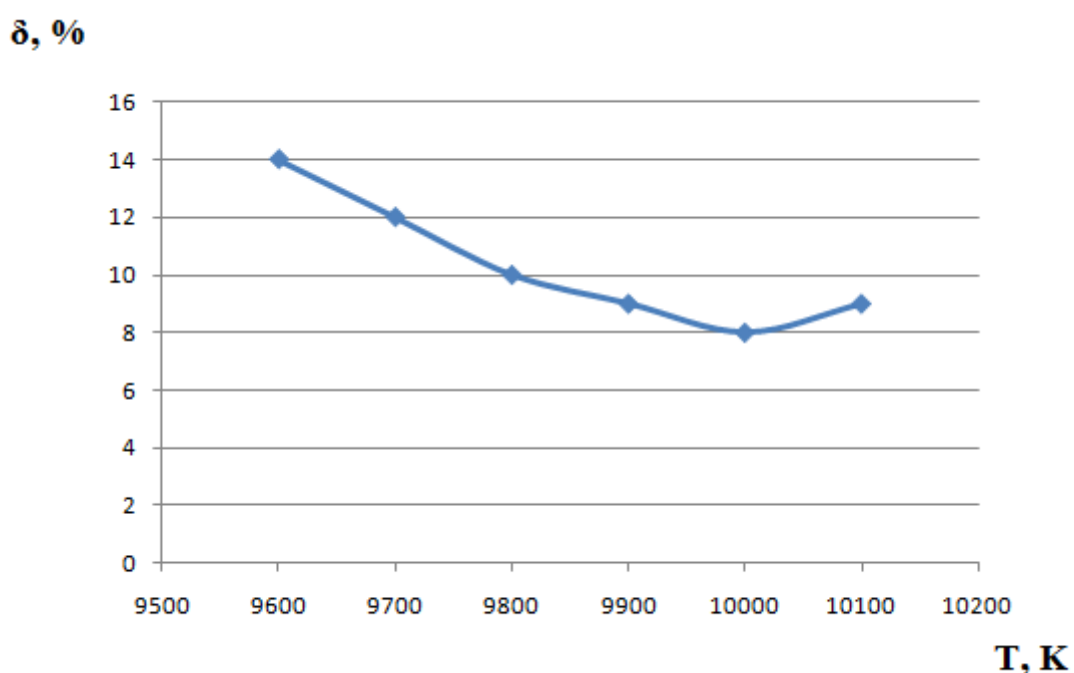


Рисунок 18 - Зависимость относительной погрешности от напряжения

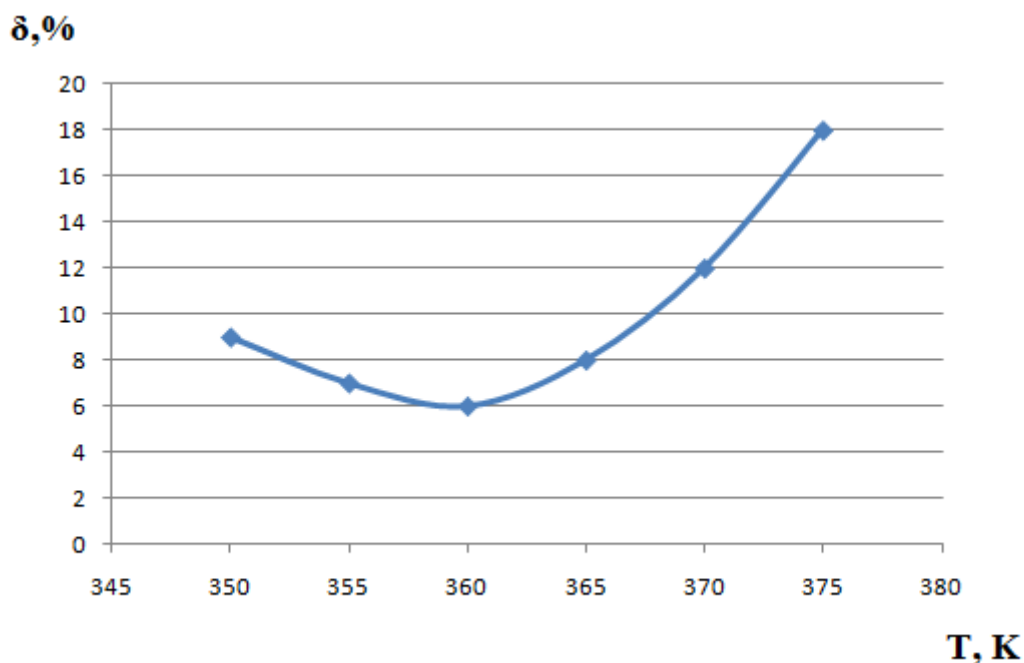


Рисунок 19 - Зависимость относительной погрешности от температуры поверхности кабеля

### 3.4 Оценка полученных результатов

Разработана математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля, использование которой позволит спрогнозировать износ изоляции; Анализ конструкции кабеля показал, что для расчета ресурса изоляции достаточно учитывать воздействия температуры и электрического поля на изоляцию. Рассмотренный пример говорит о возможности использования математической модели в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.

Анализ известных математических моделей старения изоляции показал схожий характер изменения срока службы в зависимости от воздействующих параметров. В качестве опорной математической модели решено использовать модель, которая основывается на энергетических воздействиях на изоляцию. Разработанная математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля позволяет спрогнозировать износ изоляции и необходимость ее замены с учетом корректировок, внесенных после анализа

результатов экспериментальных исследований. Важным достоинством модели является ее реализуемость в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.

Результаты экспериментальных исследований потребовали произвести корректировку математической модели определения остаточного ресурса изоляции, так как наблюдалось несовпадение результатов расчета и эксперимента, вызванное тем, что математическая модель не учитывает разрушающие изоляцию факторы, кроме напряжения и температуры. Для корректировки модели введена относительная погрешность, учитывающая воздействие других факторов.

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Современная промышленность основывается не только на технической сущности реализации проекта, но и должна учитывать роль экономических составляющих: эффективность и выгоду, привлекательность на рынке продаж, коммерческий потенциал и ресурсоэффективность. Научно-технические исследования должны быть направлены на увеличение эффективности использования проекта, увеличения сроков его эксплуатации, упрощения обслуживания и повышения ремонтпригодности.

Целью данного раздела является определение и обоснование целесообразности разработки заданного технического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, рассмотрение планово-временных и материальных показателей процесса проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решение задач:

- Анализ конкурентных технических решений;

- SWOT-анализ работы и эксплуатации кузнечного цеха электролампового завода;
- Планирование технико-конструкторских работ;
- Формирование бюджета затрат;
- Определение ресурсосберегающей эффективности проекта.

#### 4.1 Анализ конкурентных технических решений

В данном разделе производится анализ конкурентных технических решений, которые могут применяться при исследовании полимерного материала для изготовления оболочки и изоляции кабельных изделий. Такой анализ лучше всего проводить с помощью оценочной карты для возможных вариантов переработки исследуемого материала: экструдирование и вальцевание.

Сравнение данных решений помогает определить наиболее конкурентоспособный способ переработки, которая будет сочетать в себе оптимальные цену, качество и надежность.

Таблица 9 – Оценочная карта сравнения конкурентных решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б1	Б2	К1	К2
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда	0,05	4	3	0,2	0,15
1. Удобство в эксплуатации	0,05	4	2	0,2	0,1
2. Надежность в работе	0,15	2	4	0,3	0,6
3. Безопасность	0,1	4	2	0,4	0,2
4. Энергоэкономичность	0,1	4	3	0,4	0,3

5. Функциональная мощность	0,05	5	3	0,25	0,15
6. Простота эксплуатации	0,05	3	5	0,15	0,25
7. Ремонтопригодность	0,1	5	3	0,5	0,3
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Цена установки	0,2	2	3	0,4	0,6
2. Стоимость обслуживания и затраты на монтаж	0,1	2	4	0,2	0,4
3. Срок эксплуатации	0,05	3	5	0,15	0,25
Итого	1	36	37	3,15	3,3

Анализ конкурентных схем электроснабжения можно определить по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где  $B_i$  – вес показателя, выраженный в долях единицы;

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя;

$K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента.

Исходя из полученных результатов анализа получили, метод вальцевания имеет наибольший балл по сравнению с методом экструзии. Данная метод обеспечивает простоту в эксплуатации, надежность, меньшую стоимость обслуживания, однако имеет небольшую функциональную возможность и является менее безопасным, так как имеется контакт с движущимися вальцами под высокой температурой.

Метод экструзии безопаснее в использовании, имеет множество функций и автоматическое управление системой, однако установка является более дорогостоящей, а персонал должен быть специально обучен для работы на установке.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ выступает как инструмент стратегического менеджмента, который представляет собой комплексное исследование технического проекта.

Применительно к переработке полимерного материала, SWOT-анализ поможет определить: сильные стороны и преимущества технического решения проекта, слабые стороны и уязвимости проекта, благоприятные возможности для его развития, риски и наиболее эффективные действия для защиты проекта от них.

При проведении SWOT-анализа необходимо составить матрицу SWOT, в нее вносятся сильные и слабые стороны проекта, угрозы и возможности.

Для удобного использования матрицы используются обозначения:

С – сильные стороны проекта, В – возможности,

Сл – слабые стороны проекта, У – угрозы.

На первом этапе описываются сильные и слабые стороны проекта, возможности и угрозы для реализации проекта, которые появляются в его внешней среде.

На втором этапе выявляются соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям окружающей среды, которые помогают выявить степень необходимости проведения стратегических решений.

Таблица 10 – Матрица SWOT-анализа

	Сильные стороны:	Слабые стороны:
--	------------------	-----------------



	<p>С1. Энергоэффективность и экономичность технологий;</p> <p>С2. Безопасность и надёжность во время работы;</p> <p>С3. Большой срок эксплуатации;</p> <p>С4. Использование современного оборудования</p> <p>С5. Улучшенные характеристики материала</p> <p>С6.Актуальность проекта</p>	<p>Сл1. Высокая стоимость оборудования;</p> <p>Сл2. Нехватка квалифицированных производственных кадров;</p> <p>Сл3. Сложность ремонта некоторых частей оборудования.</p>
<p>В1. Улучшение технологий производства</p> <p>В2. Установка автоматизированной системы управления</p> <p>В3. Уменьшение таможенных пошлин на материалы и сырье</p> <p>В4. Сотрудничество с зарубежными компаниями</p>	<p>- Имеется большой потенциал для получения высоких эксплуатационных свойств оборудования;</p> <p>- Возможность переработки различного вида полимерного материала</p>	<p>- Увеличение числа высококвалифицированного персонала приведет к дополнительным затратам;</p> <p>- Необходимо не допускать аварийного выхода оборудования из строя, после которого потребуется ремонт;</p>

У1. Несвоевременное финансирование со стороны государственного бюджета.	- Для предотвращения выхода из строя оборудования применяются аппараты, быстро реагирующие на аварийную ситуацию;	- Некоторое оборудование не подлежит ремонту и требует полной замены, что приведет к затратам;
У2. Введение дополнительных гос. требований к стандартизации и сертификации продукции	- Высокая конкуренция способствует повышению энергоэффективности и экономичности технологии.	- Импорт нового оборудования требует больших затрат;
У3. Угрозы выхода из строя сложного энергоемкого оборудования		- Дополнительные гос. требования требуют больших затрат;
У4. Высокий уровень развития конкуренции в технологии производства		- Все вышеприведенные угрозы и слабости приведут к отказу от проекта.

Из анализа видно, что сильных сторон у проекта больше, чем слабых. Проект имеет высокую энергоэффективность, повышенную безопасность производства и обслуживания, которые в свою очередь обеспечивают высокую производительность и экономичность технологического процесса, а также большой срок эксплуатации.

Среди слабых сторон можно выделить возможность затруднения ремонта отдельных частей электрооборудования, которая может привести к увеличению затрат на поставку данных частей.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

#### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

В данном разделе нужно определить, какие этапы работ выполняются в НТИ и распределяются между руководителем и инженером, устанавливается продолжительность их выполнения.

Таблица 11 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руковод.
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме, примерный план работ	Студент
	3	Выбор направления оптимизационной задачи	Студент
	4	Календарное планирование работ	Руковод.
Теоретические исследования	5	Исследование вариантов переработки полимерного материала	Студент
	6	Выбор полимерного материала	Студент
	7	Выбор вариантов соотношения красителя и материала	Студент
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка влияния процентного содержания красителя на физико-механические свойства материала	Студент
	9	Оценка влияния способа переработки материала на физико-механические свойства материала	Студент
	10	Оценка эффективности полученных материалов	Руковод.
Разработка технической	11	Оценка надежности полученных результатов	Руковод.
	12	Вопросы безопасности и экологичности	Инженер

документации		проекта	
Оформление отчёта по НИР	13	Составление пояснительной записки по проекту	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения проекта

Трудовые затраты влияют на стоимость разработки. В данном разделе нужно определить трудоемкость работы инженера и руководителя и построить диаграмму Ганта.

Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

$T_{pi}$  - Длительность работ в рабочих днях

$T_{ki}$  - Длительность работ в календарных днях

Таблица 12 – Временные показатели проекта

Название работы	Исполнитель	Трудоёмкость работ (чел-дни)			$T_{pi}$	$T_{ki}$
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$		
Составление и утверждение технического задания	Руковод.	1	2	1	1	1
Подбор и изучение материалов по теме, примерный план работ	Студент	2	3	2	2	3
Выбор направления оптимизационной задачи	Студент	3	5	4	4	6
Календарное планирование работ	Руковод.	1	2	1	1	1
Исследование вариантов	Студент	2	3	2	2	3

переработки полимерного материала						
Выбор полимерного материала	Студент	5	7	6	6	9
Выбор вариантов соотношения красителя и материала	Студент	5	6	5	5	7
Оценка влияния процентного содержания красителя на физико-механические свойства материала	Студент	2	4	3	3	4
Оценка влияния способа переработки материала на физико-механические свойства материала	Студент	3	5	4	4	6
Оценка эффективности полученных материалов	Руковод.	3	2	6	6	9
Оценка надежности полученных результатов	Руковод.	3	4	3	3	4
Вопросы безопасности и экологичности проекта	Студент	2	5	3	3	4
Составление пояснительной записки по проекту	Студент	4	8	5	5	8
<b>Итого</b>		36	56	45	45	65

Ожидаемое значение трудоемкости:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 1 \text{ чел-дней}; \quad (4.2)$$

Продолжительность работы в рабочих днях:

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{1}{1} = 1 \text{ день}; \quad (4.3)$$

Коэффициент календарности:

- Для инженера

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,477; \quad (4.4)$$

- Для руководителя

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 67} = 1,22; \quad (4.5)$$

Продолжительность работы в календарных днях:

- Для инженера

$$T_{\kappa} = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 2 \cdot 1,47 = 2,94 \approx 3 \text{ дня.} \quad (4.6)$$

- Для руководителя

$$T_{\kappa} = T_p \cdot k_{\text{кал}} = 1 \cdot 1,22 = 1,22 \approx 1 \text{ день.} \quad (4.7)$$

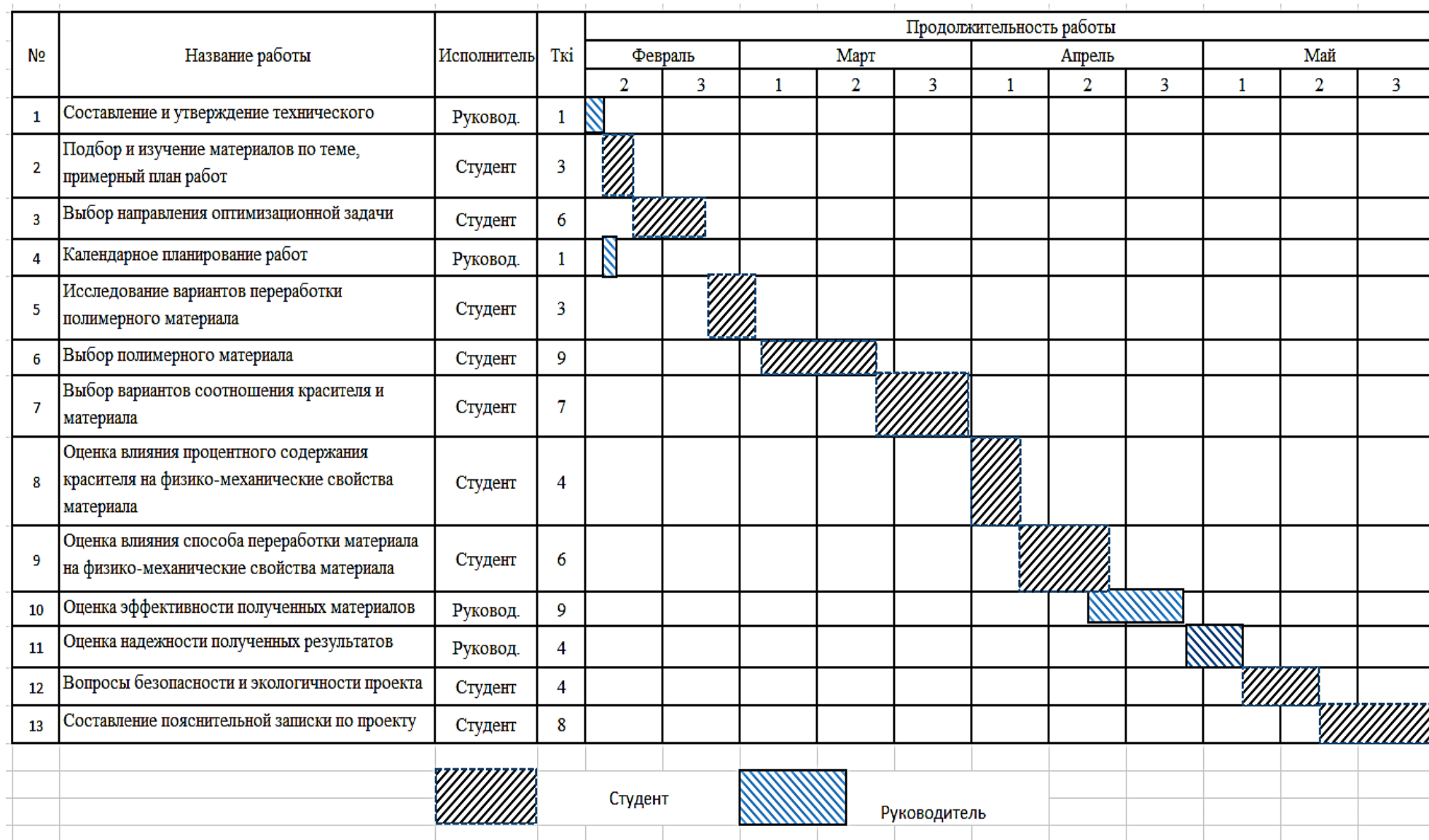


Рисунок 21 – График Ганта

### 4.3. Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат

При планировании бюджета исследования должны быть учтены все виды расходов, связанные с его выполнением.

Материальные затраты подразумевают дополнительные затраты на канцелярию, информационные носители, картриджи и т.д.

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед.,руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Карандаши	штук	1	8	8
Бумага	упаковка	1	275	275
Ручки	штук	3	17	51
Папка-скоросшиватель	штук	1	25	25
Калькулятор	штук	1	270	270
Итого:				629

#### 4.3.2 Расчет затрат на амортизацию специального оборудования для научных (экспериментальных) работ

В данном пункте анализ необходимо провести для оборудования, необходимого для выполнения научного исследования. В нашем случае таким оборудованием является персональный компьютер.

В затраты на амортизацию включаем оборудование стоимость которого превышает 40 тыс.руб., таким образом на используемый нами персональный компьютер считаются затраты на амортизацию.



Таблица 14 – Затраты на оборудование

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на оборудование,
ПК	штук	1	43000	43000

$$A = \frac{\text{Стоимость} \cdot N_{\text{Дней использ}}}{\text{Срок службы} \cdot 365} = \frac{43000 \cdot 65}{3 \cdot 365} = 2552,5 \text{ руб.} \quad (4.8)$$

#### 4.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы

Основной заработной платой является вознаграждение за выполненную работу в соответствии с установленными нормами труда.

При расчете заработной платы исполнителей учитывается основная заработная плата работников, непосредственно занятых выполнением НТИ и дополнительная заработная плата:

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}, \quad (4.9)$$

где  $З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (4.10)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

Размер среднедневной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (4.11)$$

где  $З_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года ( $M = 11,2$  для пятидневной рабочей недели;  $M = 10,4$  для шестидневной рабочей недели);

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (определяется за вычетом выходных, праздничных и больничных дней).

Месячный должностной оклад научно-технического работника:

$$Z_m = Z_{TC} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p \quad (4.12)$$

где  $Z_{TC}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{np}$  – премиальный коэффициент составляет 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{TC}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент составляет 1,3 (для г. Томска).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руковод.	Студент
Продолжительность рабочей недели	6-дневная	5-дневная
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	104
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	56	28
- невыходы по болезни	14	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	229	209

Таблица 16 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{TC}$ ,	$k_{np}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ ,	$Z_{дн}$ ,	$T_p$ ,	$Z_{осн}$ ,
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2329,1	8	18632,8
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1776,5	44	78164,2
Итого $Z_{осн}$								96797

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительной заработной платой является вознаграждение за труд сверх установленной нормы, за трудовые успехи и за особые условия труда.

Руководитель:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 18632,8 = 2235,9 \text{ руб} \quad (4.13)$$

Инженер:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 78164,2 = 9379,7 \text{ руб} \quad (4.14)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

#### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам:

- государственное социальное страхование (ФСС);
- пенсионный фонд (ПФ);
- медицинское страхование (ФФОМС).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

Руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,28 \cdot (18632,8 + 2235,9) = 5843,2 \text{ руб} \quad (4.15)$$

Инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,28 \cdot (78164,2 + 9379,7) = 24512,2 \text{ руб} \quad (4.16)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды. В 2019 году  $k_{внеб} = 28 \%$ .

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов.

$$\begin{aligned} Z_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = (Z_{осн} + Z_{доп} + Z_{внеб} + Z_{м} + A) \cdot 0,16 = \\ &= (96797 + 2235,9 + 9379,7 + 5655,4 + 23724,4 + 629 + 2552,5) \cdot 0,16 = 22555,8 \end{aligned}$$

где  $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величина коэффициента накладных расходов берется в размере 16%.

#### 4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Полученная величина затрат научно-исследовательского проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку проекта.

Таблица 17 – Бюджет затрат НТИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.	В % к итогу
1	Материальные затраты НТИ	629	0,38
2	Амортизация	2552,5	1,56
2	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	96797	59,2
3	Затраты по доп. заработной плате исполнителей темы	11615,6	7,1
4	Отчисления во внебюджетные фонды	30355,4	18,45
5	Накладные расходы	22555,8	13,8
	Бюджет затрат НТИ	164505,3	100

#### 4.4 Ресурсоэффективность

Ресурсоэффективность научного исследования определяется при помощи интегрального критерия ресурсоэффективности, который имеет следующий вид:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (4.18)$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 18 - Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
----------	---------------------	---------------------------

1. Безопасная и надёжная эксплуатация	0,3	5
2. Материальные затраты	0,2	4
3. Энергоэффективность	0,2	4
3. Простота монтажа	0,15	3
5. Расход материала	0,15	3
Итого:	1	4

Интегральный показатель ресурсоэффективности для разрабатываемого проекта:

$$I_{pi} = 0,3 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 = 4 \quad (4.19)$$

Проведенная оценка ресурсоэффективности научного исследования дает достаточно хороший результат, что свидетельствует об эффективности его реализации.

Выполняя данную часть выпускной квалификационной работы произведён анализ конкурентных технических решений, применяемых при переработке полимерного материала. С учетом различных требований к способу переработки полимерного материала, наиболее конкурентоспособным является способ вальцеванием.

С помощью SWOT-анализа были оценены сильные и слабые стороны проекта, угрозы и возможности развития. Далее было произведено календарное планирование работ при котором длительность работ составила 75 календарных дня, а также была определена их трудоемкость. На основе этих данных смоделирована и построена диаграмма Ганта. Итоговые затраты на научно-исследовательский проект составили 163529,7 руб., при этом основная доля затрат приходится на выплату заработной платы участникам проекта.

## **5. Социальная ответственность**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Темой магистерской диссертации является «Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена».

Объект исследования – оценка влияния агрессивных средств на физико-механические свойства изоляционных материалов кабельных изделий.

Исследование проводится в испытательном центре акционерного общества "Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический кабельный институт (НИКИ) г.Томск с опытным производством» (АО «НИКИ г.Томск»).

Согласно техническому заданию (ТЗ) планируется выявить на основе экспериментальных данных пригодность кабельных изделий для работы при наличии агрессивной среды. Под агрессивной средой понимается среда эксплуатации объекта, вызывающая уменьшение сечений и деградацию свойств материалов во времени. Для выполнения требований ТЗ необходимо подготовить образцы кабельных изделий и поместить их в агрессивную среду, после чего через определенные промежутки времени доставать образцы и выявлять изменения физико-механических свойств оболочки кабельных изделий.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Для эффективного управления охраной труда необходима хорошая правовая основа, которую составляют законодательные акты и нормативные правовые документы по охране труда, имеющие иерархическую структуру, обладающие различной юридической силой.

Нормы трудового права – это правила трудовых отношений, установленные или санкционированные государством посредством законодательных актов. Нормы трудового права регулируют любые отношения, связанные с использованием личного труда.

Формами реализации являются: трудовые отношения; организация труда и управление им; трудоустройство работников; социальное партнерство, коллективные отношения; содействие занятости безработных лиц; обеспечение мер по охране труда граждан; осуществление контроля и надзора за соблюдением законодательства.

На основании Трудового кодекса РФ от 30.12.2001 N 193-ФЗ, работник обязан:

- лично выполнять определенную трудовым договором функцию с соблюдением внутреннего трудового распорядка, установленного Работодателем;
- добросовестно исполнять свои трудовые обязанности, приказы, распоряжения и указания своего непосредственного руководителя;
- бережно относиться к имуществу Работодателя, в том числе находящемуся в его пользовании, правильно и по назначению использовать переданные ему для работы оборудование, приборы;
- нести иные обязанности, предусмотренные действующим законодательством Российской Федерации и локальными нормативными актами Работодателя.

В свою очередь работодатель обязан:

- предоставить работнику работу по обусловленной трудовой функции,

- обеспечить условия труда, предусмотренные трудовым законодательством и иными правовыми нормативными актами, соглашениями, содержащими нормы трудового права, коллективным договором;
- нести иные обязанности, предусмотренные действующим законодательством Российской Федерации и локальными нормативными актами Работодателя.

Согласно ТК РФ часть IV глава 16, режим рабочего времени должен предусматривать продолжительность рабочей недели. Режим труда и отдыха Работника устанавливается Правилами внутреннего трудового распорядка.

Работнику устанавливается режим работы:

- пятидневная 40 – часовая рабочая неделя (Начало рабочего дня: 8-00, окончание – 17-00, перерыв для отдыха и питания с 11-30 до 12-30, выходные дни: суббота, воскресенье).
- рабочий день сотрудника носит: нормированный характер.

Согласно приказу (минздравсоцразвития России от 01.06.2009 N 290н ред.12.01.2015) перед началом работы работника надлежит обеспечить всеми видами положенной спецодежды, спецобуви и другими средствами индивидуальной защиты.

## **5.2 Производственная безопасность**

Опасные факторы при работе с компьютером описываются в ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Основные вредные и опасные факторы при выполнении технологических процессов производства высокочастотного симметричного кабеля представлены в таблице 1.

Выявление на рабочем месте факторов производственной среды и трудового процесса, источников вредных и (или) опасных факторов осуществляется путем изучения:



- 1) технической (эксплуатационной) документации на производственное оборудование (машины, механизмы, инструменты и приспособления), используемое работником на рабочем месте;
- 2) должностной инструкции и иных документов, регламентирующих обязанности работника;
- 3) характеристик применяемых в производстве материалов и сырья;
- 4) результатов, ранее проводившихся на данном рабочем месте исследований (испытаний) и измерений вредных и (или) опасных факторов.

Выполнение ВКР тесно связано с использованием компьютерной техники.

В процессе работы с компьютером необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

Таблица 19 - Опасные и вредные факторы

Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)	Этап работ			Нормативные документы
	Разраб.	Изготовл.	Эксплуат.	
1. Отклонение показателей микроклимата	-	-	-	СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
2. Повышенный уровень шума	-	-	-	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
3. Отсутствие или недостаток естественного света	-	-	-	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП

				23-05-95
4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	-	+	-	ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N1)
5. Вещества раздражающего действия	-	+	-	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

### 5.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

#### 5.3.1 Отклонение показателей микроклимата

Принципом нормирования микроклимата является воплощение приемлемых условий для теплообмена тела человека с окружающей средой. Параметры микроклимата производственных помещений зависят от теплофизических особенностей технологического процесса, климата, сезона года, условий отопления и вентиляции.

Во время технологического процесса от электронагревателей экструдера выделяется значительное тепло, которое для поддержания оптимальной температуры в помещении целесообразно отводить с помощью вытяжной вентиляции.

Обслуживание данной установки относится к категории Па – физический труд средней тяжести, связанный с постоянной ходьбой, выполняемый стоя или сидя, но не требующий перемещений тяжести.

Требования, к помещению с использованием ПЭВМ согласно [СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03] представлены в таблице 2.

Таблица 20 - Оптимальные параметры микроклимата для помещений с использованием ПЭВМ

Температура, С°	Относительная влажность, %	Абсолютная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	10	< 0,1
20	58	10	< 0,1
21	55	10	< 0,1

В соответствии с [СанПиН 2.2.4.548-96], работа за компьютером относится к категории Ia. К категории Ia относятся работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблицах 3, 4. Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников представлены в таблице 5.

Таблица 21 - Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Т воздуха, °С	Т поверхн остей, °С	Относит. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холод- ный	Ia (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1

Таблица 22 - Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энерго- затрат, Вт	Т поверх- ностей, °С	Относите- льная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, М/с	
				Для диапазона Т ниже оптимальных величин, не более	Для диапазона Т воздуха выше оптимальных величин
Холод-	Ia (до 139)	19,0-	15-75*(2)	0,1	0,1

ный		26,0			
Теплый	Ia (до 139)	20,0- 29,0	15-75*(2)	0,1	0,1

Таблица 23 - Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, 2 Вт/м
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочем месте не должна превышать 25° С - при категории работ Ia.

При 8 часовом рабочем дне, температура воздуха на рабочем месте при категории работ Ia должна лежать в пределах 20-28 °С.

### 5.3.2 Повышенный уровень шума

Повышенный уровень шума понижает качество условия труда создавая вредное действие на организм человека. При работе в условиях длительного шумового воздействия, инженер может испытывать головную боль, раздражение, а также испытывать боли в ушах. Все это способствует ухудшению работоспособности и качества выполняемой работы.

Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки нормируется [СН 2.2.4/2.1.8.562–96.] Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ приведены в таблице 6.

Таблица 24 - Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПЭВМ

	Уровни звукового давления в октавных полосах со средне-геометрическими частотами	Уровни звука в
--	--	----------------

Гц	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	дБ
дБ	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума для инженера, работающего за компьютером не должен быть выше 50дБ. Для понижения уровня шума, помещение необходимо облицевать звукопоглощающими материалами.

### 5.3.3 Отсутствие или недостаток естественного света

Оценка освещенности рабочей зоны необходима для обеспечения нормированных условий работы в помещениях и проводится в соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03.

В производственном помещении используется искусственное и естественное освещение. Естественное освещение – боковое, осуществляемое через световые проемы в боковых наружных стенах. Искусственное освещение – общее равномерное (световой поток равномерно распределяется по помещению без учета расположения оборудования),

По СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» для лабораторий научно-исследовательских учреждений норма освещенности составляет 400лк. Наблюдение за процессом экструзии является зрительной работой малой точности (V) и норма освещенности составляет 200 лк.

Для обеспечения нормативной освещенности необходимо использовать совмещенное освещение, при котором естественное дополняется искусственным.

### 5.3.4 Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека

Длительное воздействие электромагнитных полей на организм электротехнического персонала, находящегося вблизи источника электромагнитных полей, может привести к возникновению болезней. В рабочем помещении предоставляется персональный компьютер с ЖК-

монитором. Интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучений от экрана монитора допускается в пределах  $10-100 \text{ мВт/м}^2$ . Для понижения воздействия этих видов излучения необходимо использовать мониторы с низким уровнем излучения, применять защитные экраны.

Опасным фактором является наличие в помещении большого числа оборудования, использующего однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Перед началом работы за компьютером человек должен убедиться в исправности электрических проводов, выключателей, штепсельных вилок и розеток. Убедиться в целостности корпуса, отсутствия на нем посторонних предметов, бумаги и т.п. Вентиляционные отверстия в корпусе включаемого оборудования не должны быть закрыты занавесками, завалены бумагой, заклеены липкой лентой или перекрыты каким-либо другим способом.

Класс помещения по степени опасности поражения людей электрическим током: помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность. Класс помещения определяется по ПУЭ.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при однофазном (однополюсном) прикосновении незащищенного от земли человека к незащищенным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- при прикосновении к незаземленным частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
- при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Основные меры, обеспечивающие электробезопасность при прикосновении к конструктивным частям электрооборудования, заключаются в:

- контроле сопротивления двойной изоляции;
- применении заземления и защитного отключения

- изолировании (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- своевременном осмотре технического оборудования, изоляции.

В качестве защиты от поражения электрическим током, сотрудникам необходимо проходить инструктаж по технике безопасности.

### 3.5 Вещества раздражающего действия

В процессе производства кабеля одним из основных вредных факторов является испарение летучих продуктов из агрессивной среды (от полимерного материала).

Испаряющиеся летучие продукты могут нанести вред здоровью человека. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 по степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделяют на четыре класса опасности.

Экструзионная линия будет использоваться для переработки полимерного материала. Используемые фторопласт и компаунд относятся к 1-ом классу опасности (чрезвычайно опасные). При горячей обработке фторопласты могут разлагаться, выделяя перфторизобутилен и другие весьма токсичные продукты. Концентрация продуктов разложения 0,001% опасна для здоровья, тем более что они обладают кумулятивным эффектом. При нарушении правил техники безопасности и поступлении токсических веществ в производственную среду может развиваться фторопластовая лихорадка: напоминающая по своей клинической картине литейную лихорадку, или металлическую.

Для устранения или уменьшения воздействия данного вредного фактора производится вентиляция помещения. Поэтому в отделениях с экструзионными линиями должна быть приточно-вытяжная вентиляция с кратностью обмена не менее 5 и приняты все меры предосторожности и охраны труда, рекомендуемые для вредных производств.

## 5.4 Экологическая безопасность

Переработка полимерного материала является экологически не безопасной.

Жизненный цикл полимерных материалов в кабельной промышленности начинается с этапа производства сырья, после на этапе переработке используя различные добавки из смолы получают пластикат. На этапе производства кабельного изделия следует рассматривать выделение летучих компонентов в процессе экструзии. Далее идет эксплуатация изделия и по ее окончанию стадия утилизации.

Сшитый Полиэтилен (СПЭ) находит применение во многих отраслях практической деятельности человека, что связано с его уникальными свойствами. Однако, существенным фактором для ограничения его применения служит: большое количество отходов производства, сложных для повторного передела и являющихся вследствие этого загрязнителями окружающей среды.

Причинами этого являются:

- нерастворимость ПТФЭ во всех известных растворителях, что затрудняет нанесение фторсодержащих покрытий;
- отсутствие простых, надёжных и экологически безопасных способов переработки отходов;
- высокая химическая, термическая, климатическая, физическая и биологическая стойкость ПТФЭ делают отходы практически вечными.

В связи с чем, странах Евросоюза в ближайшее время планируется запретить захоронение отходов, содержащих фторполимеры. Потребление фторопластов в разных отраслях новой техники растёт ежегодно на 10–20%. В России скопились самые крупные количества отходов фторопластов

Необходимы консолидированные усилия научно-инженерного и экологического сообщества для полной и безопасной переработки этих отходов в новые товарные и сырьевые продукты, в целях предотвращения



нарастающего загрязнения окружающей среды. Наиболее рентабельным, технологичным и экологичным способом утилизации является переработка отходов на предприятиях, производящих фторполимеры и обладающих технической базой для утилизации побочных газообразных продуктов.

### **5.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Возможными ЧС при работе в помещении за компьютером могут быть и в производственном помещении: внезапное разрушение зданий и сооружений, пожар, взрыв в здании, поражение электрическим током. Наиболее вероятное ЧС - пожар в здании.

В рабочем помещении имеется электропроводка напряжением 220 вольт, предназначенная для питания электроприборов и освещения. При неправильной эксплуатации оборудования и коротком замыкании электрической цепи может произойти возгорание, которое грозит уничтожением техники, потери ценной информации и другого имеющегося оборудования.

Согласно техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, каждый объект защиты должен иметь систему обеспечения пожарной безопасности. Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты включает в себя систему предотвращения пожара, систему противопожарной защиты, комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Пожар в отделе может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнем (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов). К причинам электрического характера относятся, короткое замыкание, перегрузка проводов, искрение и т.д.

Все научно-исследовательские отделы и производственные цеха, должны соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-91 и иметь средства пожаротушения по ГОСТ 12.4.009-83.

Оборудование для производства кабельных изделий расположено в цехе с классом опасной зоны П-Па. Все производственные и подсобные помещения цеха обеспечены первичными средствами пожаротушения и пожарным инвентарем, находящимся на доступном месте.

Организационные мероприятия: противопожарный инструктаж обслуживающего персонала; обучение персонала правилам техники безопасности; издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия: соблюдение эксплуатационных норм оборудования; обеспечение свободного подхода к оборудованию; содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводников.

К техническим мероприятиям относится соблюдение противопожарных требований при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения.

В испытательном центре, а также в производственном цеху имеется порошковый огнетушитель типа ОП-5, рубильник, около входных дверей приведены планы эвакуации в случае пожара, и, на достигаемом расстоянии, находится пожарный щит, системы предотвращения пожара и противопожарной защиты и система оповещения.

Если возгорание произошло в электроустановке или ПЭВМ, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2, или порошковые типа ОП-5. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

Комплекс организационных и технических мероприятий пожарной профилактики, таких как устройство эвакуационных путей, систем обнаружения пожара в случае возникновения пожара может обеспечить безопасность людей, ограничить распространение огня, предотвратить пожар, а также создать условия для успешного тушения пожара.

Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации, который представляет собой заранее разработанный план (схему), в которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации по п. 3.14 ГОСТ Р 12.2.143-2009.

Планы эвакуации людей при пожаре из научно-исследовательского кабельного института НИКИ, представлены на рисунке 1.

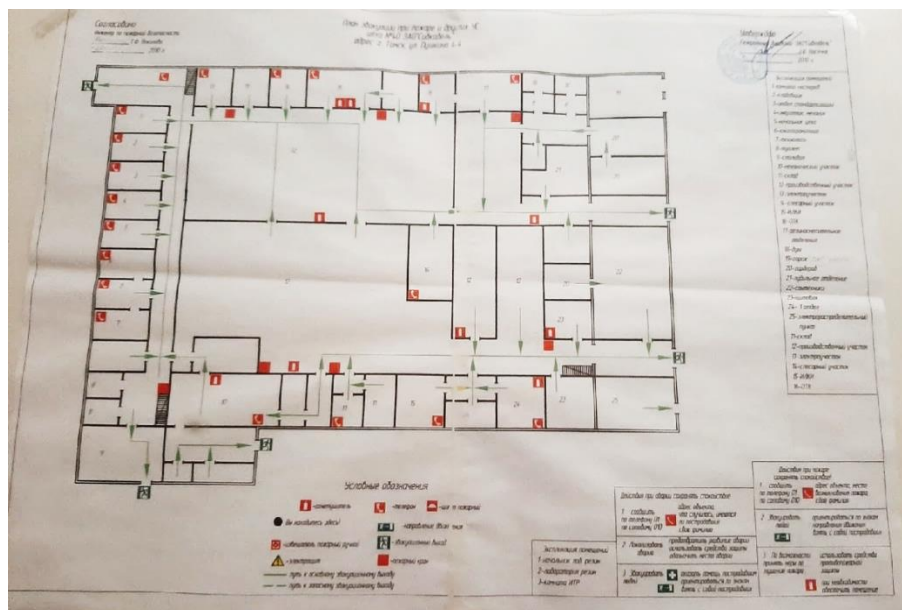


Рисунок 22 - План эвакуации АО «НИКИ г. Томск»

## ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ

Основным фактором, влияющим на производительность людей, занимающиеся разработками и производством кабельной продукции являются комфортные и безопасные условия труда.

Условия труда в рабочей аудитории характеризуются возможностью воздействия на работников следующих производственных факторов: шума, выделение вредных веществ, действие микроклимата, параметров технологического оборудования и рабочего места.

В данном разделе проанализированы вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье человека, основные меры их профилактики и

ликвидации. Были отмечены источники негативного воздействия, меры коллективной и индивидуальной защиты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известное многообразие методов диагностики и контроля состояния изоляции подтверждает актуальность исследования по их разработке, а также может послужить основой для разработки методов определения остаточного ресурса диэлектрика. Многие из перечисленных испытаний являются разрушающими для изоляции и могут привести к быстрому выходу кабеля из строя, в связи с этим, актуальным является вопрос разработки неразрушающих методов контроля состояния изоляционного материала. Анализ известных математических моделей старения изоляции показал схожий характер изменения срока службы в зависимости от воздействующих параметров.

В качестве опорной математической модели решено использовать модель Кучинского Г. С., так как она основывается на энергетических воздействиях на изоляцию. Разработанная математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля позволяет спрогнозировать износ изоляции и необходимость ее замены с учетом корректировок, внесенных после анализа результатов экспериментальных исследований. Важным достоинством модели является ее реализуемость в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.

Результаты расчета потребовали произвести корректировку математической модели определения остаточного ресурса изоляции, так как наблюдалось несовпадение результатов расчета и эксперимента, вызванное тем, что математическая модель не учитывает разрушающие изоляцию факторы, кроме напряжения и температуры. Для корректировки модели решено ввести коэффициент, учитывающий воздействие других факторов. Оценка показала, что погрешность расчета срока службы изоляции составляет около 8%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: Учеб. Пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 368 с
2. Миллер В.В. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена и кабельная арматура к ним. Технология сшивки, производство и контроль качества поставляемой продукции. Реконструкция и строительство кабельных сетей в городских условиях. - XIX-е заседание Ассоциации электроснабжения городов России «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО», тез. докл., Ханты-Мансийск, 2013.
3. ГОСТ Р 55025-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия.
4. Доклад по силовым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 1-10 кВ. - Департамент топливно-энергетических ресурсов г.Москвы, 2005
5. Боев А. Сравнение кабелей с БПИ и СПЭ-изоляцией // Кабель-NEWS. - 2010. - № 11.
6. ГОСТ Р МЭК 60287-2011 Кабели электрические расчет номинальной токовой нагрузки
7. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учебник для вузов / Э. Т. Ларина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1996. — 464 с.: ил.
8. Привезенцев, В. А. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии : учеб. пособие для энергет. и электротехн. вузов / В. А. Привезенцев, Э. Т. Ларина; ред. В. А. Привезенцев. - Москва: Энергия, 1970. 88
9. Дмитриев, М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 154 с.

10. Дмитриев, М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. // Новости Электротехники. – 2008.- №2(50).
11. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. - Л.: «Энергия». Ленингр. Отд-ние., 1979. - 224 с.
12. Койков, С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. / С.Н. Койков, А.Н. Цикин М. - Л.: Энергия, 1968. -186 с.
13. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. - Новосибирск: Наука, 2007. - 155 с.
14. Пат. 2215296 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М. – № 2002100545/09; заявл. 03.01.2002; опубл. 27.07.2003, бюл. №21. – 2 с.
15. Пат. 2115131 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М.; – № 94032785/09; заявл. 08.09.1994; опубл. 10.07.1998. – 2 с.
16. Степанов, В.М. Определение электрического сопротивления изоляции и емкости кабелей / В.М. Степанов, С.В. Ершов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2010. - № 3–5. - С. 62–64.
17. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие / Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. - М.: Издательство ТПУ, 2014. - 36 с.
18. Международный стандарт ICCSR26000:2011 «Социальная ответственность организации».
19. ГОСТ 12.1.004-91. "Пожарная безопасность. Общие требования".

20. ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
21. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия.
22. ГОСТ 982-80. Масла трансформаторные. Технические условия.
23. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
24. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.
25. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
26. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
27. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.
28. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
29. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
30. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.
31. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
32. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.



33. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий.
34. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
35. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
36. Приказ 328н. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок.
37. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

## **Приложение А**

### **Introduction**

Cross-linked polyethylene (XLPE) is a widely used material for power cable insulation, where it has largely replaced oil impregnated paper. Although both the material and the process have been known and used for several years, there is a need in the industry for a deeper understanding of the manufacturing process and its influence on the final product properties. Mechanical, thermal and chemical modeling of the manufacturing process of a cable can be used as a tool for prediction and optimization of the final product. The present work focuses on the mechanical modeling of insulation during the manufacturing process, namely on finding a suitable constitutive model for XLPE and utilizing it in prediction of thermal residual stresses and strains in the cable insulation.

### **Cable manufacturing process**

By the process of cross-linking, polyethylene (PE) is changed from a thermoplastic into a single, interwoven molecule. Improved heat resistance is the most important advantage of XLPE over low density polyethylene (LDPE). In a power cable, the conductor temperature increases with the current transmitted through the cable, thus more power can be sent through an XLPE cable than a non-cross-linked cable of the same size. The most widely used method for cross-linking polyethylene in the cable industry is the continuous vulcanization (CV) method with peroxide additives. High temperature triggers the decomposition of peroxide into free radicals. Free radicals react with polyethylene molecules, extracting hydrogen atoms, thus forming a radical on the polymer chain, which reacts with another polymer chain radical to form a cross-link. A typical manufacturing line for high voltage power cable utilizing cross-linked polyethylene (XLPE) is usually of two types: a vertical continuous vulcanization (VCV) line or a catenary

continuous vulcanization (CCV) line. These conductors differ in the physical location of the cable transported through the process. In a VCV line the cable is positioned vertically, whereas in a CCV line the cable is fed through the system with a slight downward slope. The important stages of cable manufacturing can be seen in the schematic of Figure 23.

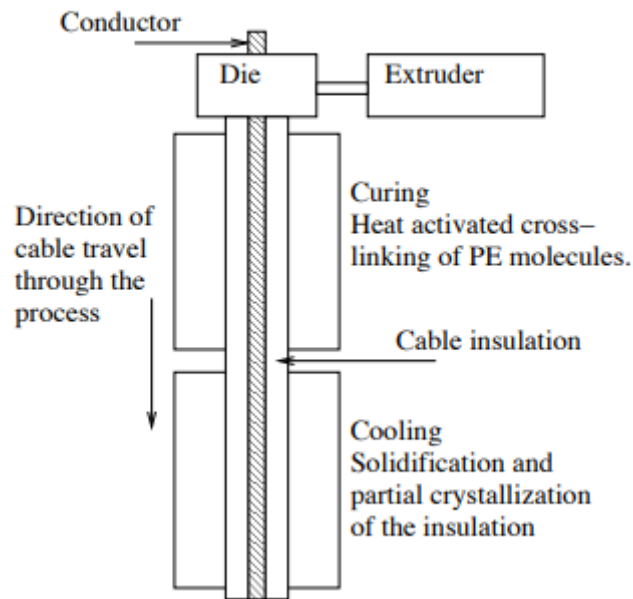


Figure 23 Schematic of power cable manufacturing process with its most important parts

In a first step of the continuous process, the polymer is extruded onto a metal conductor, after which heating of the cable takes place. During this stage, cross-linking of the molecules is achieved at temperatures above the melting point of the polymer. The last stage of the process is cooling of the cable to room temperature, achieved by circulating water or gas around the cable. Starting at the outer radius and continuing inwards, partial crystallization of the insulation takes place. Cooling of polymer products is often a problematic manufacturing stage as it introduces residual stresses into the material. In particular, for high voltage cable insulation the knowledge of such stresses is desirable as it influences both mechanical and electrical properties of the cable. It is widely known that electrical

breakdown strength is influenced by the mechanical stress. But electrical breakdown strength is also influenced by the presence of voids or other defects, the formation of which is related to the buildup of residual stresses during manufacturing. During installation or repair of a cable, residual stresses may cause problems at cable joints or terminations, since the insulation tends to shrink back in the axial direction on the conductor. This phenomenon is commonly referred to as shrink-back in the industry and there is a maximum allowed level for its regulation by an international standard IEC (2004).

### **Structure and properties of PE and XLPE**

The result of cross-linking in PE, a single large interwoven molecule called gel, makes up for most part of a cross-linked sample. XLPE used for high voltage cable insulation is usually filled with LDPE and its microstructure and properties are similar to those of polyethylene in general. Polyethylene is a partially crystalline solid, whose properties are strongly influenced by the relative amounts of crystalline and amorphous phases present. Density is strongly related to crystallinity, with higher density polyethylene having higher degree of crystallinity. Other important characteristics influencing the physical properties are basic molecular properties such as chain branching, average molecular weight and molecular weight distribution.

The basic structure of PE can be represented as the chain  $(\text{CH}_2\text{CH}_2)_n$ -, which has no branches on the backbone. In commercial PE,  $n$  may be between about 400 and above 50000 and chain branches are usually presented on the chain backbones. The smallest crystalline units, called lamella, are planar in shape and consist of chains that are perpendicular to the plane and fold back and forth, every 5-15 nm, although sometimes less frequently. Lamellae are interconnected by a few chains which pass from one lamella, through a small amorphous region, to another lamella. As it can be seen in figure 2, the lamellae are ordered into much larger

spherically shaped units, called spherulites. The lamellae extend radially in the spherulite, with the molecule chains oriented in a direction that is perpendicular to the radius of the spherulite. Spherulites consist of both crystalline and amorphous parts and are interconnected by amorphous regions. Spherulites are formed from initial central lamellae, which branches subsequently form the spherulite. It is also possible that spherulites grow as much that they impinge into each other, thus obtaining the shape of polyhedral. Density of a pure PE crystal is  $1.00 \text{ g/cm}^3$ , whereas the amorphous phase is about  $0.855 \text{ g/cm}^3$ .

LDPE contains short chain branches on the chain backbone. These short chain branches disrupt chain folding and thus reduce the degree of crystallinity to 40 - 60% from about 70-90% of unbranched PE. The crystalline melting point  $T_m$  is also reduced to  $105\text{-}115^\circ\text{C}$  from  $135^\circ\text{C}$  of unbranched PE. Melting usually occurs over a wide temperature range, beginning at  $70\text{-}80^\circ\text{C}$  for a polymer of density  $0.92 \text{ g/cm}^3$ . The density is  $0.912\text{-}0.935 \text{ g/cm}^3$  compared to the higher  $0.960\text{-}0.970 \text{ g/cm}^3$  of unbranched PE. A wide interval in degree of cross-linking and gel content is possible to achieve in cured XLPE samples depending on the process and base material. Gel contents close to 100% are possible to achieve, but for LDPE, which is the common base material for high voltage cables, cross-linked with dicumyl peroxide the gel content is more likely to be between 70% to 80%. According to several authors, the fully developed spherulite crystal structure is not preserved in cross-linked polyethylene. Instead XLPE was found to have what is described as a sheaf like microstructure. These sheaves look like undeveloped spherulites and are considerably smaller in size than spherulites in PE. It seems that the crystal development in XLPE stops at various stages before reaching the fully developed spherulites of PE. It is also reported that the microstructure changes with the degree of cross-linking. The author of the article « Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV » claims that high cross-link density results in parallel compact lamellar bundles and with decreasing cross-link density the lamellae have a tendency to splay apart and

form sheaf-like structures. It was found that the nucleation density of these lamellar bundles increases with cross-link density.

### **Thermal residual stress**

The problem of thermal residual stress is found in a wide variety of polymer products where rapid inhomogeneous cooling is part of the manufacturing process. For power cables, cooling starts at the outer layers of the insulation where the temperature drops almost instantaneously from well above the melting point to room temperature. As a result the outer layers stiffen, but the inner layers still occupy a larger volume introducing stresses into the insulation. As cooling proceeds radially into the insulation, solidification produces further thermal stresses. Usually thermal stresses partially persist in the finished product since most polymers are viscoelastic. Furthermore, the stress development is also influenced by the semi-crystalline microstructure of certain polymers like PE and XLPE. In the past, the development of thermal stresses has been treated mostly as a thermo-elastic problem and it has been recognized that the predicted stress state can be viewed as a limiting case to the actual stress state in polymers which show viscoelastic behavior. Crystallization during cooling changes the density of the material and the constitutive relationship. As a result of the rapid inhomogeneous cooling, the varying sub-cooling of the polymer melt at solidification influences the degree of crystallinity and the shape and size of the crystals. Crystalline regions grow during cooling, the elastic modulus of the polymer changes which influences the development of the residual stress. For this polymer it is also found that at high cooling rates crystallization is suppressed and thus the process becomes similar to amorphous polymers.

### **Constructive modeling**

At infinitesimal strain, linear viscoelasticity can be used for modeling of the mechanical behavior. For the uniaxial case, the normal stress  $\sigma$  is related to the normal strain  $\epsilon$  by the relaxation modulus,  $E(t)$ , according to []:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \theta) \frac{d\epsilon}{d\theta} d\theta. \quad (96)$$

Early on it has been recognized that characterization of the relaxation modulus can for many materials be simplified if isothermal relaxation curves at different temperatures can be brought together to form a “master curve” by shifting them parallel to the logarithmic time axis. This is called time-temperature shifting and the class of materials that exhibit this behavior is denoted as thermal simple materials (TSM). Equation (1) changes now according to:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(\xi(t) - \xi(\theta)) \frac{d\epsilon}{d\theta} d\theta, \quad (97)$$

In equation the shift factor depends on the instantaneous temperature. Materials in the TSM category are amorphous polymers like e.g. polymethylmethacrylate. In general, it can be stated that polymeric materials whose behavior cannot be described by equation (2) fall into the category of thermal complex materials (TCM). For a class of TCM materials, master curves can be formed by applying both horizontal and vertical shifts to the relaxation curves. In this case the constitutive equation can be written as:

$$\sigma(t) = A(T(t), \phi(t)) \int_0^t E(\xi(t) - \xi(\theta)) \frac{d\epsilon}{d\theta} d\theta, \quad (98)$$

Where  $A(T(t), \phi(t))$  is the vertical shift factor which depends on temperature and other material parameters represented by  $\phi(t)$ . Equation also changes to:

$$\xi(t) = \int_0^t a(T(\theta), \phi(\theta)) d\theta, \quad (99)$$

Accounting incorporate dependence of the horizontal shift factor  $a$  on other parameters. For electro technical paper, the need of vertical shifting has been attributed to the influence of moisture content, which enters as a parameter into the shift function. For semi-crystalline polymers like polyethylene it is believed that changes in crystallinity with temperature cause the need for both horizontal and vertical shifting of relaxation curves. As described by several textbooks on the subject, there are many ways to mathematically represent viscoelastic behavior. A common, traditional way is the use of “spring and dashpot” models, like the generalized Maxwell or Kelvin models. For any of these models, the constitutive equation can take the form of a differential equation consisting of terms which are derivatives of stress or strain. The resulting expression for the relaxation modulus, a series of exponential terms. An example where this has been applied to describe relaxation of polyethylene can be found in an electro technical. A drawback of these models can be the large number of parameters involved. For some materials the relaxation modulus appears to be proportional to time raised to some fractional power, at least in a certain finite time interval. Such observations are the basis of power law and fractional derivate models. According to the simplest form of power law model, the relaxation modulus can be expressed by:

$$E(t) = E_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-m}, \quad 0 < m < 1, \quad (100)$$

where  $E_0$  and  $m$  are material parameters, whereas  $t_0$  can be chosen arbitrarily. According to fractional derivative models, integer order derivatives of the generalized Maxwell or Kelvin models are replaced by fractional order derivatives. Mainly applied in modeling of dynamic problems, these models have a theoretical basis developed from molecular theory.

### **Non-linear viscoelastic models**



Whereas some polymers show a large linear region others, like most types of PE and XLPE, exhibit non-linear behavior from a very low strain. For this reason a non-linear constitutive equation is necessary for accurate models. Non-linear viscoelastic constitutive models, just as the linear viscoelastic models, are based on the idea that stress depends on the entire deformation history, or, alternatively, that strain depends on the entire stress history. The different models can be categorized under three major types: the multiple integral, the single integral and the differential equation formulation. A constitutive model, utilizes a multiple integral formulation. A detailed account of non-linear viscoelasticity is based on multiple integral models. Although theoretically general enough to describe most kinds of viscoelastic behavior, these types of mathematical models are inconvenient in practice due to the difficulties associated with the experimental determination of the large numbers of necessary parameters. Less general, but still applicable to a wide range of polymers, single integral formulations of the constitutive behavior are more accessible in terms of experimental characterization. This model is its original form. The transient part of the constitutive equation incorporates strain dependence into the linear viscoelastic equations according to:

$$\sigma(t) = h_1(\varepsilon) \int_0^t E(\xi(t) - \xi(\theta)) \frac{d(\varepsilon h_2(\varepsilon))}{d\theta} d\theta, \quad (101)$$

Where

$$\xi(t) = \int_0^t a(T(\theta), q(\theta); \varepsilon(\theta)) d\theta \quad (102)$$

It defines the reduced time and  $h_1$ ,  $h_2$  are material properties that depend on strain. A strain dependence may also be found for the shift factor,  $a$ , which generally depends on temperature  $T$ . Non-linear viscoelastic behavior found in some epoxy adhesives is facilitated by incorporating dependence of the shift factor on free volume. Other authors introduced other state variables, here represented by  $q$ , to account for different effects. E.g. the effects of physical aging on the mechanical

behavior of certain semi-crystalline polymers are quantified in this way by the free volume. Numerous papers are available on the application of electrical type models both in finite element formulations and experimental studies. A selection shows that among the studied materials are amorphous polymers and semi-crystalline polymers, as well as paper composites with polymer resin. In one case the non-linearity or anharmonicity of the springs is related to the constant which is a material parameter describing the speed reaction of molecular interaction.

### **Experimental characterization**

Characterizing the time dependent constitutive behavior of polymers is a complex task. Depending on the type of material several techniques can be used, however the choice between methods is not trivial. It can depend on the type of polymer but also on the type of behavior that is of interest e.g. short- or longtime behavior, dynamic properties, etc. Care has to be taken to conduct the experiments in a controlled environment as most polymers have mechanical properties which change significantly with temperature or even moisture. Material properties such as density or crystallinity may affect the mechanical behavior and need to be measured before the mechanical tests. For the same reason the specimens may need to be conditioned prior to experiments.

### **Physical properties**

In the present study experiments were performed on different XLPE, as it was unexpected to find a dependence on some state parameters, as degree of crystallinity or gel content, of the constitutive law. These different types of XLPE were characterized with respect to gel content, density and fraction of crystalline material. Details of these tests are presented in Paper A. The results are reproduced here in Table 1. Degree of crystallinity was determined from both density measurements with a density column and differential scanning calorimetry (DSC).

## **Mechanical testing**

For the mechanical characterization of XLPE A numbers of different tests were performed to find electrical tension, density and crystallinity for the types of XLPE.

### **Pressure Volume Temperature (pVT) measurements**

Bulk behavior of a material can be obtained in a so called pVT apparatus in which a small sample of a material is surrounded by mercury and enclosed in a piezometer cell. The cell is inside a pressure vessel where hydrostatic pressure can be applied to it. At any constant temperature and pressure the change, relative to a reference state, in specific volume is recorded after equilibrium is reached. These measurements yielded both the bulk modulus and thermal expansion coefficient of XLPE, shown here in Figures 3 and 4, respectively.

## **Conclusion**

As set out in the Introduction the goal of this article was to provide a modeling tool which can be utilized in optimization of the manufacturing process with regards to the residual stress and strain of the cable insulation. This has been largely achieved during the course of the work. The experimental investigation of XLPE that was initially performed provides a firm foundation for the modeling work. The constitutive equations incorporate crystallinity and temperature dependent parameters. This has the benefit that the model can be coupled to heat transfer and crystallization models for the same process.